

ДЛЯ УЧАЩИХСЯ ТЕХНИКУМОВ

М. М. Кацман

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН



ББК 31.26
К 30
УДК 621.313.001.24(075.32)

Рецензенты: Н. Г. Карельская, А. Е. Загорский

Кацман М. М.

К 30 Расчет и конструирование электрических машин: Учеб. пособие для техникумов. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 360 с., ил.

В пер.: 95 к. 25 000 экз.

Изложены вопросы электромагнитного, механического, теплового и вентиляционного расчетов и основы конструирования асинхронных и синхронных машин и машин постоянного тока общего назначения. Приведены расчетные формулы и необходимые для практических расчетов вспомогательные материалы.

Для учащихся техникумов по специальности «Электромашиностроение», представляет интерес для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами расчета и конструирования электрических машин.

К $\frac{2302030000-633}{051(01)-84}$ 109-84 ББК 31.26

6П2.1.08

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последнее десятилетие в области создания электрических машин наблюдается значительный технический прогресс: разработаны и внедрены новые виды электрической изоляции, обладающие повышенной надежностью и уменьшенной толщиной, применены активные и конструкционные материалы, обусловившие повышение технико-экономических показателей электрических машин, усовершенствованы методики электромагнитного и теплового расчетов и принципы конструирования электрических машин. В результате перечисленных мероприятий был разработан и освоен в производстве ряд новых общепромышленных и специализированных серий электрических машин с улучшенными технико-экономическими показателями.

Достигнутые успехи в производстве электрических машин в значительной мере обусловлены возросшим качеством подготовки специалистов, в том числе и техников для электромашиностроения.

В нашей стране большое внимание уделяется учебной литературе. Однако вопросы проектирования и расчета электрических машин в учебной литературе для техникумов освещены недостаточно полно. Со времени последнего издания учебника для техникумов по расчету и конструированию электрических машин * прошло более 30 лет. Настоящее издание является учебным пособием по курсу «Расчет и конструирование электрических машин» для учащихся электромеханических техникумов по специальности «Электромашиностроение».

В книге рассмотрены вопросы проектирования асинхронных двигателей, синхронных машин и машин постоянного тока общего назначения. При этом излагаемая методика расчета, рекомендуемые значения электромагнитных нагрузок и предлагаемые конструктивные решения базируются на электрических машинах современных серий: асинхронных двигателях 4А, синхронных машинах СГ2, СД2, СДН2 и СДНЗ2, машинах постоянного тока 2П. При написании рукописи автором использована современная техническая литература по проектированию электрических машин, список которой приведен в книге.

---

* **Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А., Сергеев П. С.** Проектирование электрических машин. М.: Госэнергоиздат, 1950.

Уровень изложения учебного материала книги соответствует теоретической и практической подготовке учащихся, приступающих к изучению предмета. Книга содержит примеры электромагнитного, теплового, вентиляционного расчетов, расчета рабочих характеристик асинхронных и синхронных двигателей, двигателя постоянного тока. Кроме того, в книге приведены примеры механического расчета различных элементов электрических машин. Все это будет способствовать лучшему усвоению материала книги и послужит полезным пособием при выполнении учащимися курсовых и дипломных проектов.

Книга содержит некоторый справочный материал, однако в процессе изучения курса и выполнения проектов не исключено применение электротехнических справочников, каталогов и чертежей электрических машин.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность рецензентам: доктору техн. наук А. Е. Загорскому и инж. Н. Г. Карельской за ценные замечания, которые были учтены автором при доработке рукописи.

Все замечания по содержанию книги автор просит присылать по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Электротехническая промышленность является одной из важнейших отраслей народного хозяйства. Широкая сфера применения электротехнических изделий, их огромное значение для процессов производства и потребления электрической энергии, а также в развитии механизации и автоматизации производственных процессов делают электротехническую промышленность ключевой отраслью, определяющей научно-технический прогресс.

Коммунистическая партия и Советское правительство уделяют огромное внимание электрификации промышленности, транспорта, сельского хозяйства, а следовательно, развитию электротехнической промышленности как технической базы электрификации. Электрификация играет ведущую роль в развитии всех отраслей народного хозяйства и осуществлении современного технического прогресса.

Электромашиностроение — это основная отрасль электротехнической промышленности, изготовляющая генераторы для производства электрической энергии и электродвигатели для привода станков, механизмов, транспортных средств, бытовых электроустройств и т. д.

За годы Советской власти отечественное электромашиностроение достигло огромных успехов. Если в дореволюционной России по существу не было электромашиностроительной промышленности, то теперь изделия таких крупных электромашиностроительных объединений и заводов, как «Электросила», «Динамо», Харьковский электромеханический завод (ХЭМЗ), завод им. Владимира Ильича и др., известны во многих странах мира.

Еще в годы первой пятилетки была проведена специализация электромашиностроения. Это позволило на крупных электромашиностроительных предприятиях сосредоточить квалифицированные кадры инженеров и техников, а также необходимое оборудование, что обеспечивало разработку и серийное производство определенных видов электрических машин. В соответствии с этой специализацией появились разновидности электромашиностроения, основными из которых являются:

производство гидро- и турбогенераторов и синхронных компенсаторов;

производство крупных электродвигателей для привода прокатных станов, горно-промышленного оборудования, мощных компрессорных установок и т. д.;

производство тяговых и крановых электродвигателей;

производство электродвигателей постоянного тока и асинхронных мощностью до 400 кВт для привода общепромышленного оборудования;

производство электрических машин малой мощности для бытовых электроприборов, электроинструментов, устройств автоматики и т. д.

Основными достижениями в области турбогенераторостроения являются разработка и освоение в производстве турбогенераторов мощностью 500, 800 и 1200 МВт. Создание таких турбогенераторов стало возможным благодаря существенному усовершенствованию систем охлаждения с применением комбинированного газоводяного охлаждения. Значительное развитие получила конструкция турбогенераторов. Усовершенствовано крепление обмотки статора как в пазовой, так и в лобовой части. Применена высоковольтная изоляция на термореактивных связующих. В современных типах турбогенераторов применена тиристорная система возбуждения.

В области гидрогенераторостроения весьма важным достижением является создание мощных генераторов с высокими технико-экономическими показателями. На крупнейших ГЭС страны успешно эксплуатируется целый ряд гидрогенераторов мощностью от 260 до 590 МВ·А. Изготовлен рекордный по своим техническим данным гидрогенератор для Саяно-Шушенской ГЭС мощностью 640 МВ·А.

В энергосистемах СССР успешно эксплуатируется серия крупных синхронных компенсаторов мощностью 50, 100 и 160 МВ·А с применением водородного охлаждения.

Создание подобных электрических машин большой единичной мощности стало возможным в результате проведенных в СССР комплексных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также благодаря большому опыту, накопленному при проектировании, изготовлении и эксплуатации высокоиспользованных электрических машин.

Значительные успехи достигнуты в производстве крупных электродвигателей. Так, разработана и освоена в производстве новая серия синхронных двигателей СТД с частотой вращения 3000 об/мин, мощностью 12 500 кВт на напряжение 6 и 10 кВ. Техническое перевооружение и развитие отраслей, использующих крупные электродвигатели, потребовало расширения номенклатуры этих двигателей. Например, были разработаны асинхронные двигатели мощностью 5500 кВт для нужд атомной энергетики, а для погружных насосных агрегатов были созданы асинхронные двигатели мощностью 1000 кВт.

Ведутся работы по созданию новых серий крупных электродвигателей с высокими технико-экономическими показателями,

внедрение которых в производство даст большой экономический эффект как в сфере производства, так и в сфере эксплуатации.

За последнее десятилетие разработаны и освоены в производстве единые серии электрических машин: серия трехфазных асинхронных двигателей 4А и серия машин постоянного тока 2П. По своим технико-экономическим показателям электрические машины этих серий не уступают продукции лучших зарубежных фирм. Единые серии содержат все необходимые народному хозяйству модификации основного исполнения, специализированные исполнения по конструкции, по условиям окружающей среды и т. д. Единые серии электрических машин 4А и 2П полностью соответствуют рекомендациям МЭК* по шкале мощностей, высотам оси вращения и установочным размерам.

Производство электрических машин единых серий распределено между электромашиностроительными заводами отрезками серий по нескольку типоразмеров. Это дает возможность организовать массовое производство электродвигателей наиболее употребительных типоразмеров (мощностью до 100 кВт) и серийное производство электродвигателей других типоразмеров.

В настоящее время ведутся работы по созданию единых серий электродвигателей общего назначения с еще более высокими технико-экономическими показателями, в том числе с более высокой надежностью и пониженным уровнем шума, с меньшим расходом материалов. Серии будут едиными для всех стран СЭВ.

Столь значительные успехи достигнуты отечественным электромашиностроением благодаря труду наших ученых и многочисленных коллективов разработчиков и технологов-электромашиностроителей. Проектирование электрической машины — это сложная комплексная задача, включающая расчет и выбор размеров статора, ротора и других элементов электрической машины и конструирование деталей и сборочных единиц с последующей компоновкой электрической машины в целом. Для успешного решения этой задачи необходимы знания теории электрических машин, свойств электротехнических и конструкционных материалов, технологии и оборудования для производства электрических машин.

Проектирование электрической машины — это решение задачи со многими неизвестными. Поэтому в результате проектирования при одних и тех же исходных данных можно получить несколько вариантов машины.

Выбор оптимального (наилучшим образом соответствующего предъявляемым требованиям) варианта получается в результате сравнения всех полученных вариантов. Решение этой задачи требует большой затраты труда. Применение при расчете машины (серии машин) цифровых ЭВМ облегчает и сокращает во времени решение этой задачи. Другой путь получения оптимального или близкого к нему варианта — повышение точности расчетов

---

* МЭК — Международная электротехническая комиссия — международная организация по стандартизации в области электротехники и электроники.

применением значений электромагнитных нагрузок и расчетных коэффициентов, полученнных на основе проектирования, изготовления и эксплуатации электрических машин, близких по основным параметрам и условиям эксплуатации к проектируемой машине.

В настоящее время перед отечественным электромашиностроением стоит задача создания новых образцов электрических машин с высокими технико-экономическими показателями, совершенных в эксплуатации, удовлетворяющих различным требованиям.

XXVI съезд КПСС определил очередные задачи по дальнейшему развитию народного хозяйства нашей страны. В качестве главной задачи XI пятилетки выдвинуто обеспечение дальнейшего роста благосостояния советского народа на основе ускорения научно-технического прогресса и интенсивного развития экономики. Значительная роль в решении этой задачи отводится электрификации промышленности, транспорта и сельского хозяйства. Выработку электроэнергии в XI пятилетке решено довести до 1550—1600 млрд. кВт·ч. При этом основная часть прироста выработки электроэнергии должна произойти за счет электроэнергии, производимой на атомных и гидроэлектростанциях. Предстоит создать турбо- и гидрогенераторы большой единичной мощности с высокими технико-экономическими показателями. Кроме того, будут разработаны новые серии электродвигателей, удовлетворяющие разнообразным требованиям машиностроения, станкостроения, металлургии, транспорта и т. д. Будут созданы силовые трансформаторы большой единичной мощности для дальних линий электропередачи, рассчитанных на напряжения 1150 кВ переменного тока и 1500 кВ постоянного тока.

Выполнение задач, поставленных XXVI съездом КПСС, потребует от рабочих и инженерно-технических работников электротехнической и других отраслей промышленности больших знаний и умения применять их на практике.

Часть первая

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Глава первая

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

1.1. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ

Электрические машины, как и любые другие проектируемые изделия, должны удовлетворять целому комплексу требований, так как только в этом случае они будут успешно выполнять функции, для которых они предназначены. Поэтому прежде чем приступить к проектированию электрической машины, необходимо конкретизировать требования, которым она должна удовлетворять.

Современный уровень развития электромашиностроения характеризуется большим разнообразием электрических машин, различающихся конструкцией, рабочими характеристиками, способностью выдерживать воздействие внешних факторов (температуры, влажности) и т. п. Поэтому требования, предъявляемые к этим машинам, также весьма разнообразны. Весь комплекс этих требований разделяют на два вида — технические и экономические.

Технические требования можно обобщить и сформулировать следующим образом: электрическая машина должна надежно работать в условиях, для которых она предназначена, в течение срока не менее указанного в технических условиях (ТУ), развивая при этом требуемую мощность при установленных напряжении, частоте вращения, КПД и других параметрах, указанных в паспорте машины; при этом машина должна быть удобной и безопасной в эксплуатации.

Однако приведенная формулировка технических требований не содержит конкретных сведений о допускаемых отклонениях параметров машины от номинальных, о допускаемых значениях температуры окружающей среды и влажности, а также целый ряд других конкретных сведений, без знания которых проектирование электрической машины невозможно.

Необходимые технические требования к проектируемой электрической машине изложены в соответствующих ГОСТ. Например, ГОСТ 183-74 «Машины электрические вращающиеся» определяет общие технические требования ко всем вращающимся электрическим машинам (кроме машин для бортовых систем подвижных средств транспорта). Эти общие технические требования дополняются техническими требованиями других ГОСТ, определяемыми в зависимости от назначения проектируемой машины (электродвигатель, генератор или преобразователь), ее мощности, напряжения и

т. п. Кроме того, отдельные отрасли народного хозяйства предъявляют к электрическим машинам некоторые дополнительные технические требования. Эти требования обычно регламентируются отраслевыми нормалями или стандартами, ТУ. Возможны также и совершенно индивидуальные требования, вытекающие из конкретных условий эксплуатации проектируемой машины.

Экономические требования к проектируемой машине в конечном итоге сводятся к тому, чтобы процесс преобразования энергии с применением новой (проектируемой) электрической машины давал большую экономию общественного труда, чем это было при применении старой машины. При этом имеется в виду экономия и в сфере эксплуатации электрической машины, и в сфере ее производства. Поэтому экономические требования к проектируемой машине определяются, с одной стороны, эксплуатационными свойствами электрической машины, а с другой,— технологичностью ее конструкции и стоимостью примененных в ней материалов.

Эксплуатационные свойства электрической машины определяются удобством ее монтажа и простотой управления, энергетическими показателями (КПД, $\cos\varphi_1$), возможностью ремонта и другими свойствами, характеризующими экономичность машины в процессе ее эксплуатации.

Значительные резервы для удовлетворения экономических требований к проектируемой машине заложены в создании технологичной конструкции машины. Конструкция машины считается технологичной, если она, полностью удовлетворяя техническим требованиям и обеспечивая необходимые эксплуатационные свойства, позволяет применить при ее изготовлении высокопроизводительные технологические процессы при минимальных затратах рабочей силы и рациональном использовании оборудования и материалов.

При этом следует учитывать некоторые факторы, влияющие на технологичность конструкции электрической машины, например масштаб производства, определяющий целесообразность применения тех или иных методов обработки (например, конструкция машины, технологичная в условиях единичного прозводства, может оказаться нетехнологичной при серийном изготовлении).

К основным способам повышения технологичности конструкции машины относят: сокращение числа деталей машины без усложнения их конструкции; максимальную унификацию деталей и сборочных единиц проектируемых машин; соответствие выбранной точности изготовления и качества обработки поверхности техническим требованиям, предъявляемым к машине; сокращение количества отверстий, резьб, фасок и других конструктивных элементов; широкое внедрение деталей, изготавливаемых из заменителей дорогих и дефицитных материалов, например из пластмасс.

Непрерывная связь конструкции машины и технологии ее изготовления обязывает конструкторов электрических машин уделять серьезное внимание тщательной проработке технологичности каждой сборочной единицы, каждой детали. При этом конструктор должен учитывать существующий уровень производства и реальную возможность его усовершенствования, для того чтобы весь комплекс необходимых технологических усовершенствований можно было осуществить в течение срока освоения новой электрической машины.

Формулируя технические и экономические требования для проектируемой электрической машины, необходимо помнить, что новая машина по своим технико-экономическим показателям (КПД, габариты, удельная материалоемкость, стоимость и т. д.) должна быть лучше выпускаемых в настоящее время электрических машин. При этом в качестве объекта для сравнения следует выбирать лучшие из имеющихся в отечественной и зарубежной практике аналогов.

1.2. СТАНДАРТИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Стандартизация основных параметров электрических машин: номинальной мощности, номинального напряжения, номинальной частоты вращения, высоты оси вращения, установочных и присоединительных размеров — создает определенные удобства и выгоду как при проектировании и изготовлении электрических машин, так и при комплектовании этими машинами энергетических установок и устройств электропривода. Стандартизация указанных параметров позволяет избежать неоправданного увеличения типоразмеров электрических машин. Кроме того, такая стандартизация необходима для международной торговли электрическими машинами и различным оборудованием, на котором эти машины устанавливаются.

Для электрических машин мощностью до 1000 кВт ГОСТ 12139-74 установлен следующий ряд номинальных мощностей, кВт:

0,06	0,18	0,55	1,5	4,0	11	22	45	90	160	315	630
0,09	0,25	0,75	2,2	5,5	15	30	55	110	200	400	800
0,12	0,37	1,1	3,0	7,5	18,5	37	75	132	250	500	1000

Номинальные напряжения питающих сетей переменного и постоянного тока до 1000 В определяет ГОСТ 21128-75, а сетей переменного тока свыше 1000 В—ГОСТ 721-77.

Номинальные напряжения, В, для электрических машин (до 1000 В) приведены в табл. 1.1.

В настоящее время установлена определенная экономически обоснованная связь между номинальной мощностью и напряжением для двигателей напряжением до 1000 В:

для асинхронных двигателей

Мощность, кВт	0,06—0,37	0,55—11	15—110	132—400
Напряжение, В	220, 380	220, 380, 660	220/380, 380/660	380/660

для двигателей постоянного тока

Мощность, кВт	0,12—0,55	0,12—315	22—800	400—1000	500—1000
Напряжение, В	110	220	440	600	750

Таблица 1.1

Генераторы			Двигатели		
Постоянный ток	Переменный ток		Постоянный ток	Переменный ток	
	однофазный	трехфазный		однофазный	трехфазный
28,5	42	42	27	40	40
115 }	230	230	110	220	220
230 }		400	220	380	380
460 }		690	440	660	660

Примечание. Для трехфазного тока указаны линейные напряжения.

Асинхронные двигатели мощностью до 200 кВт и выше могут изготавливаться на напряжение 6000 В, а мощностью 630 кВт и выше — 10 000 В.

Номинальные частоты вращения электрических машин определены ГОСТ 10683-73.

За высоту оси вращения h электрической машины принимается расстояние от оси вращения вала до опорной плоскости лап (рис. 1.1). Высоты осей вращения электрических машин согласно ГОСТ 13267-73 должны соответствовать следующему ряду: 25, 28, 32, 36, 40, 45, 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000 мм.

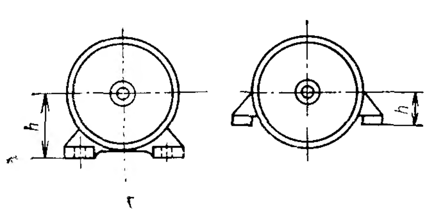


Рис. 1.1. Высота оси вращения электрических машин

Установочные и присоединительные размеры электрических машин должны соответствовать ГОСТ 18709-73, ГОСТ 20839-75 и др.

При проектировании электрических машин следует руководствоваться увязкой установочных размеров с номинальными мощностями и частотами вращения, принятой в современных сериях электрических машин. Такая увязка для асинхронных двигателей единой серии 4А приведена в § 8.1, а для машин постоянного тока серии 2П — в § 10.1.

1.3. КОНСТРУКТИВНЫЕ ФОРМЫ ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Конструктивные формы исполнения электрических машин определяются в основном тремя факторами: степенью защиты, способом охлаждения и способом монтажа.

Условное обозначение степени защиты IP — начальные буквы английских слов International protektion, например IP11. Первая цифра обозначает степень защиты персонала от соприкосновения

с токоведущими и вращающимися частями и от попадания внутрь машины твердых тел, вторая цифра обозначает степень защиты от проникновения воды внутрь машины. Для электрических машин напряжением до 1000 В установлено шесть степеней защиты, обозначаемых следующим образом:

0 — отсутствует защита;

1 — защита от случайного соприкосновения большого участка человеческого тела с токоведущими и вращающимися частями; отсутствует защита от преднамеренного соприкосновения; имеется защита от попадания внутрь твердых тел диаметром не менее 52,5 мм;

2 — защита от соприкосновения пальцев человека с токоведущими и вращающимися частями и защита от попадания внутрь машины твердых тел диаметром не менее 12,5 мм;

3 — защита от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями инструмента, проволоки и других предметов, толщина которых превышает 2,5 мм; защита от попадания внутрь машины твердых тел диаметром не менее 2,5 мм;

4 — защита от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями предметов толщиной более 1 мм и защита от попадания внутрь машины твердых тел толщиной не менее 1 мм;

5 — полная защита от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями и полная защита от вредных отложений пыли внутри машины.

Для этих же машин существует девять степеней защиты от проникания воды внутрь машины:

0 — защита отсутствует;

1 — защита от капель сконденсировавшейся воды, падающих вертикально;

2 — защита от капель воды, падающих под углом не более 15° к вертикали;

3 — защита от дождя, падающего под углом не более 60° к вертикали;

4 — защита от брызг воды любого направления;

5 — защита от водяных струй в любом направлении;

6 — защита от воздействий, характерных для палубы корабля, включая захлестывание морской волной;

7 — защита при погружении в воду в течение времени и давлении, указанных в ГОСТ или ТУ.

8 — защита при погружении в воду на неограниченное время при давлении, указанном в ГОСТ или ТУ.

Возможные степени защиты электрических машин на напряжение до 1000 В приведены в табл. 1.2.

Способы охлаждения электрических машин определены ГОСТ 20459-75. Обозначение способов охлаждения электрических машин состоит из начальных букв IC английских слов International cooling ряда букв и цифр, обозначающих способ охлаждения. Сначала указывается буква, обозначающая вид хладагента: A — воздух, H —

Таблица 1.2

Степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями и от попадания посторонних тел внутрь машины	Степени защиты от проникновения воды внутрь машины								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	IP00	IP01	—	—	—	—	—	—	—
1	IP10	IP11	IP12	IP13	—	—	—	—	—
2	IP20	IP21	IP22	IP23	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	IP43	IP44	—	—	—	—
5	—	—	—	—	IP54	IP55	IP56	IP57	IP58

водород, *W* — вода и т. д. Если хладагентом является только воздух, то буква опускается. Затем идет несколько цифр: первая цифра условно обозначает устройство цепи охлаждения для циркуляции хладагента, например воздуха, вторая — способ перемещения хладагента. Если машина имеет несколько цепей охлаждения (например, внутренняя вентиляция и наружный обдув), то в обозначении может быть четыре цифры — две для обозначения наружной цепи охлаждения и две — для внутренней.

Ниже приведены примеры обозначения наиболее распространенных способов охлаждения электрических машин:

IC01 — защищенная машина с самовентиляцией: вентилятор расположен на валу машины;

IC0041 — закрытая машина с естественным охлаждением;

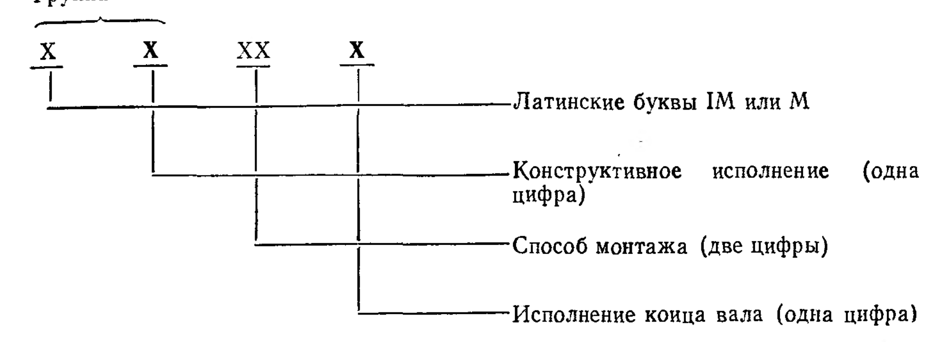
IC0141 — закрытая машина, обдуваемая наружным вентилятором, расположенным на валу машины;

IC0151 — закрытая машина, имеющая корпус с трубами для прохода воздуха, с наружным и внутренним вентиляторами.

Опыт проектирования электрических машин определил увязку исполнения машин по степеням защиты и способам охлаждения с высотами оси вращения машин, которую следует рассматривать как рекомендуемую при проектировании асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока, предназначенных для привода механизмов, не предъявляющих особых требований к пусковым и регулировочным свойствам двигателей, скольжению, КПД и т. п. (табл. 1.3).

Монтаж электрических машин в местах их установки осуществляется обычно на лапах или посредством фланцев. При этом возможно разное пространственное расположение оси вала машины (например, горизонтальное или вертикальное). Электрические машины большей мощности обычно выполняют со стояковыми подшипниками.

Разновидности конструктивного исполнения электрических машин по способу монтажа определены ГОСТ 2479-79, предусматривающим следующую структуру условного обозначения конструктивного исполнения электрических машин по способу монтажа:



Латинские буквы IM представляют собой начальные буквы английских слов International Mounting.

Возможны следующие условные обозначения конструктивных исполнений электрических машин (первая цифра в обозначении):

1 — на лапах с подшипниковыми щитами; возможно применение пристроенного редуктора;

2 — на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах);

3 — без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите (или щитах), с цокольным фланцем;

4 — без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине;

5 — без подшипниковых щитов;

6 — на лапах с подшипниковыми щитами и со стояковыми подшипниками;

7 — на лапах со стояковыми подшипниками (без подшипниковых щитов);

8 — с вертикальным валом, кроме машин групп от IM1 до IM4;

9 — специального исполнения по способу монтажа.

Для каждого из конструктивных исполнений (первая цифра) возможно несколько способов монтажа. В результате получается

Таблица 1.3

Двигатель	Степень защиты	Высота оси вращения, мм	Способ охлаждения
Асинхронный	IP23	160—560	IC01
	IP44	50—355	IC0141
	IP44	400—630	IC0151
Постоянного тока	IP22	80—315	IC01
	IP22	355—560	IC17
	IP44	80—200	IC0041
	IP44	132—200	IC0141
	IP44	225—500	IC37

более трехсот различных конструктивных исполнений электрических машин по способу монтажа.

Форма выступающего конца вала и число концов вала (один или два) обозначаются следующим образом (последняя цифра):

0 — без выступающего конца вала;

1 — с одним выступающим концом вала цилиндрической формы;

2 — с двумя выступающими концами вала цилиндрической формы;

3 — с одним выступающим концом вала конической формы;

4 — с двумя выступающими концами вала конической формы;

5 — с одним выступающим фланцевым концом вала;

6 — с двумя выступающими фланцевыми концами вала;

7 — с двумя выступающими концами вала, со стороны привода — фланцевым, а с противоположной стороны — цилиндрическим;

8 — все прочие исполнения выступающих концов вала.

Ниже приведены примеры обозначения наиболее распространенных конструктивных исполнений машин по способу монтажа:

IM1001 — на лапах с двумя подшипниковыми щитами, конец вала цилиндрический, направлен горизонтально, лапы обращены вниз;

IM1011 — на лапах с двумя подшипниковыми щитами, конец вала цилиндрический, направлен вертикально вниз;

IM1031 — то же, что и IM011, но конец вала направлен вертикально вверх;

IM2101 — на лапах с двумя подшипниковыми щитами, с фланцем, не доступным с обратной стороны, конец вала цилиндрический, направлен горизонтально, лапы обращены вниз;

IM2111 — на лапах с двумя подшипниковыми щитами, с фланцем, не доступным с обратной стороны, конец вала цилиндрический, направлен вертикально вниз;

IM2131 — то же, что и IM2111, но конец вала направлен вертикально вверх.

1.4. КЛИМАТИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

На условия эксплуатации электрических машин, а следовательно, и на их надежность значительное влияние оказывают климатические факторы внешней среды.

К климатическим факторам внешней среды относятся температура воздуха и диапазон ее колебаний, относительная влажность и давление воздуха или газа, солнечная радиация, дождь, ветер, пыль, соляной туман, иней, действие плесневых грибов, содержание в окружающей среде коррозионно-активных материалов.

Проектируемые электрические машины могут иметь различные климатические исполнения, определяемые ГОСТ 15150-69 и условно обозначаемые одной или двумя буквами (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Климатические исполнения электрических машин	Обозначение
Двигатели, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озерах для макроклиматических районов:	
с умеренным климатом	У
с холодным климатом	ХЛ
с влажным тропическим климатом	ТВ
с сухим тропическим климатом	ТС
как с сухим, так и с влажным тропическим климатом	Т
для всех макроклиматических районов на суше (общеклиматическое исполнение)	О
Двигатели, предназначенные для установки на морских судах для макроклиматических районов:	
с умеренно холодным морским климатом	М
с тропическим морским климатом для судов каботажного плавания или иных, предназначенных для плавания только в тропической зоне	ТМ
для неограниченного района плавания	ОМ
Двигатели, предназначенные для всех макроклиматических районов на суше и на море	В

ГОСТ 15150-69 устанавливает пять категорий мест размещения машин при эксплуатации. Категория места размещения обозначается цифрами 1, 2, 3, 4, 5.

Электрические машины общего назначения при отсутствии особых требований по климатическим воздействиям, проектируются для районов с умеренным климатом (исполнение У) и категорий мест размещения 3 или 4. Категория 3 предполагает работу машины в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры и влажности воздуха и воздействия песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе. К категории 4 относятся помещения с искусственно регулируемыми климатическими условиями (например, закрытые отапливаемые и вентилируемые производственные или иные помещения).

При проектировании электрических машин необходимо учитывать также воздействие механических факторов внешней среды. ГОСТ 17516-72 устанавливает несколько групп условий эксплуатации изделий, обозначаемых М1 — М30. Эти группы характеризуются диапазоном частоты вибраций, их амплитудой, параметрами ударных нагрузок и т. д.

По условиям эксплуатации с учетом воздействия механических факторов электрические машины общего назначения относят к группе М1, т. е. они могут быть установлены на фундаментах, на стенах производственных помещений и т. д. При этом внешние источники не должны создавать вибрации частотой выше 35 Гц и максимальным ускорением не более 5 м/с^2, ударные нагрузки недопустимы.

1.5. СЕРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ЕДИНИЧНАЯ МАШИНА

Электрические машины общего назначения, а также машины, предназначенные для применения в определенных отраслях народного хозяйства, изготавливаются, как правило, сериями. Серия электрических машин представляет собой ряд машин возрастающей мощности, имеющих однотипную конструкцию и удовлетворяющих общему комплексу требований.

Электрические машины, предназначенные для наиболее широкого применения в различных отраслях народного хозяйства, выпускаются едиными сериями. Для электрических машин единых серий характерен высокий уровень унификации деталей и сборочных единиц, их максимальная взаимозаменяемость.

При проектировании серии машин при заданных высотах оси вращения принимают размеры статоров и роторов такими, чтобы довести до минимума количество требуемых штампов при минимальных отходах. Это достигается тем, что одни и те же листы используют для изготовления сердечников машин, соседних по шкале мощностей, путем изменения длины этих сердечников. Другие мероприятия по унификации позволяют сократить номенклатуру пресс-форм, моделей для отливок и другой технологической оснастки.

По своим технико-экономическим показателям электрические машины единых серий соответствуют существующему уровню мировой техники. Разработка и освоение производства единой серии электрических машин представляет собой задачу государственного значения.

За последние годы отечественным электромашиностроением разработаны и освоены в производстве единая серия асинхронных двигателей 4А, серия машин постоянного тока 2П, серии синхронных машин СГ2, СД2, СДН2, СДН32 и ряд других серий, предназначенных для широкого применения в различных отраслях народного хозяйства.

По мере развития науки и техники, создания материалов с улучшенными свойствами, накопления опыта проектирования и эксплуатации электрических машин оказывается возможным создавать более совершенные серии машин как по техническим, так и по экономическим показателям. Поэтому периодически взамен существующих единых серий создаются новые, более совершенные.

Наряду с сериями электрических машин общего назначения промышленностью изготавливаются серии электрических машин специализированного назначения: тяговые, краново-металлургические, судовые и др.

Но бывают случаи, когда для оснащения какой-либо установки требуется электрическая машина с техническими данными, которыми ни одна из серийных машин не обладает. В этом случае приходится проектировать и изготавливать единичную электрическую машину (или несколько машин). При проектировании такой машины необходимо принимать во внимание конструкции деталей и сборочных единиц электрических машин, выпускаемых на данном заводе, для того чтобы максимально их использовать в проектируемой единичной машине.

Основной задачей расчета электрической машины (серии машин) является нахождение оптимального варианта. Оптимальным считается такой вариант машины, в котором полное удовлетворение технических требований сочетается с наибольшим экономическим эффектом в народном хозяйстве. Наиболее трудоемко нахождение *оптимального варианта* при проектировании серии машин, так как это связано с необходимостью расчета большого числа вариантов с последующим их сравнением и обобщением полученных результатов. Тщательная проработка большого числа вариантов оказывается возможной лишь при использовании современной вычислительной техники. Обычно для этой цели используются цифровые ЭВМ, которые при соответственно составленной программе не только выполняют электромагнитные, тепловые и экономические расчеты по нескольким вариантам, но и определяют оптимальный вариант машины с выдачей всех ее конструктивных параметров.

Однако создание серии электрических машин или отдельной машины, оптимальной по всем показателям, практически невозможно. Так, машины, оптимальные по рабочим и пусковым параметрам, могут оказаться трудоемкими в изготовлении, иметь высокую себестоимость. По этой причине оптимальному проектированию электрических машин должен предшествовать выбор *критерия оптимальности*. Например, если проектируется электрическая машина (серия машин) специализированного назначения, то при выборе критерия оптимальности следует учесть особые условия эксплуатации машины и специальные требования к ее рабочим и пусковым параметрам. Так, если машина предназначена для установки на транспортном средстве, то ее критериями оптимальности могут быть минимальные масса и габариты. При этом машина может оказаться трудоемкой в изготовлении и иметь повышенную себестоимость.

Если же проектируется электрическая машина или серия машин общего назначения, то критериями оптимальности могут быть минимальные затраты на ее изготовление и минимальные эксплуатационные расходы. Так, асинхронные двигатели единой серии 4А спроектированы оптимальными для нужд народного хозяйства. Критерием оптимальности была принята минимальная стоимость двигателей в производстве и эксплуатации. При этом учитывались стоимость материалов, трудозатраты, амортизация оборудования, затраты на проектирование, стоимость электроэнергии при эксплуатации двигателей, затраты на их ремонт и обслуживание.

1.6. ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Проектирование электрической машины (серии машин) предусматривает несколько стадий, каждая из которых завершается

либо разработкой определенного вида технической документации, либо изготовлением образцов и проведением их испытаний.

ГОСТ 2.103-68 «Стадии разработки» и ГОСТ 15.001-73 «Разработка и постановка продукции на производство» предусматривают следующие стадии разработки: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочий проект, установочные серии.

Организации, принимающие участие в создании новой электрической машины (серии машин), в соответствии с выполняемыми функциями разделяются на заказчиков, разработчиков, изготовителей и потребителей (иногда заказчик является одновременно и потребителем).

Рассмотрим содержание стадий разработки.

Техническое задание. Проектированию электрической машины (серии машин) предшествует разработка технического задания, которое определяет технико-экономические требования и показатели качества машины, а также устанавливает основные этапы работы, сроки их выполнения и службы (организации и предприятия), выполняющие этапы работы. Техническое заданне разрабатывается на основе предъявленных заказчиком исходных требований с учетом современных достижений науки и техники.

Техническое задание выполняется разработчиком, рассматривается и согласовывается потребителем и заводом-изготовителем.

Техническое предложение. Техническое предложение определяет научно-техническую возможность и экономическую целесообразность осуществления технического задания в предлагаемые сроки. Оно содержит различные варианты конструкций машины. После сравнительного анализа выбирают наиболее оптимальный вариант конструкции машины. Техническое предложение выполняется разработчиком.

Эскизный проект. При разработке эскизного проекта устанавливают принципиальное решение по разработке машины (серии машин). На этой стадии производят: сравнительную оценку вариантов по выбору материалов и конструктивных решений проектируемых изделий, изготовление и испытание макетных образцов, предварительную проработку основных вопросов технологии, оценку технологичности и показателей унификации и стандартизации предварительной конструкции изделий. Эскизный проект согласовывают с заказчиком и заводом-изготовителем.

Технический проект. Технический проект содержит подробную разработку решений, принятых в эскизном проекте, с учетом всех требований технического задания. Технический проект выполняется разработчиком и включает окончательное техническое решение, дающее полное представление о конструкции проектируемых изделий и материалах для их изготовления. Этот проект включает чертежи разрабатываемых изделий (обычно общие виды) и подробные расчеты. Технический проект должен обеспечить соответствие конструкции машины (серии машин) техническому заданию, высокий уровень технологичности принятых конструкций, удобство

их эксплуатации с учетом современных требований технической эстетики. Результаты расчетов и целесообразность конструкторских решений должны быть подтверждены результатами экспериментальных исследований макетных образцов изделий, изготовленных на стадии технического проекта. Технический проект согласовывают с заказчиком и заводом-изготовителем.

Рабочий проект. На этой стадии проектирования выполняют следующее: разработку конструкторской документации для изготовления опытных образцов и опытных партий изделий всех габаритов и типоразмеров; изготовление и испытание опытных образцов, корректировку конструкторской документации по результатам испытаний опытных образцов; государственные межведомственные испытания опытных образцов и корректировку документации по результатам этих испытаний.

Вся техническая документация, полученная на этой стадии, передается заводу-изготовителю для технической подготовки производства к изготовлению установочной серии машин (в случае серийного производства).

Установочные серии. Установочные серии электрических машин (при их серийном производстве) выпускаются заводом-изготовителем серийной продукции по типовым технологическим процессам. Машины установочной серии подвергаются квалификационным испытаниям на возможность получения заданных параметров в серийном производстве. После этого производится корректировка технической документации на проектируемые изделия с учетом их серийного изготовления.

1.7. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Надежность является важнейшим технико-экономическим показателем любого изделия, в том числе и электрической машины. Чем выше надежность электрических машин, тем реже они выходят из строя, тем дешевле их эксплуатация. Поэтому повышение надежности машин имеет огромное народнохозяйственное значение, так как является дополнительным источником увеличения парка действующих электрических машин.

Надежность — это свойство изделия (электрической машины) выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

К основным показателям, определяющим надежность электрической машины относятся исправность, работоспособность, отказ.

Исправность — это состояние, при котором машина соответствует всем требованиям, установленным для нее технической документацией, например техническими условиями.

Работоспособность — это состояние, при котором электрическая машина способна выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных технической документацией. Разница в этих понятиях состоит в том, что работоспособная машина в отличие от исправной может не

соответствовать некоторым требованиям технической документации, не влияющим на выполнение машиной заданных функций. Например, машина может иметь некачественную окраску, либо другой дефект, не влияющий на основные параметры машины — мощность, КПД, частоту вращения и т. п. Строго говоря, такая машина неисправна, но в течение определенного времени остается работоспособной. Нарушение работоспособности машины называется *отказом*. Различают отказы внезапные и постепенные. Отказ называют **внезапным**, если он характеризуется скачкообразным изменением одного или нескольких заданных параметров. Если же отказу предшествует постепенное закономерное изменение какого-либо параметра, то он называется **постепенным**. Например, постепенный износ коллектора может послужить причиной нарушения коммутации в машине постоянного тока (постепенный отказ), наличие неисправного подшипника или дефектной щетки также может послужить причиной отказа машины (внезапный отказ).

Электрическая машина должна обладать **долговечностью** — свойством сохранять работоспособность до наступления предельного состояния, оговоренного технической документацией. Предельное состояние — это состояние машины, при котором ее дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности, или неустранимого ухода заданных параметров за установленные пределы, или необходимости проведения ремонта.

Долговечность электрической машины определяется техниечским ресурсом и сроком службы. **Технический ресурс** — это наработка машины от начала эксплуатации или от возобновления эксплуатации после ремонта до наступления предельного состояния, а **срок службы** — это календарная продолжительность эксплуатации машины от ее начала или от возобновления после ремонта до наступления предельного состояния.

Вошедшее в определение технического ресурса понятие «наработка» представляет собой продолжительность работы машины в единицах времени или выполненную работу в киловатт-часах, километрах, тоннах и т. п. в зависимости от вида работы, выполняемой устройством, на котором установлена машина. Если электрическая машина работает непрерывно, то ее технический ресурс, измеренный в единицах времени, равен сроку службы. Если же машина работает с перерывами, то технический ресурс определяется суммарной наработкой. В этом случае технический ресурс машины, измеренный в единицах времени, меньше срока службы.

В зависимости от отрезка времени, на протяжении которого определяют наработку, различают суточную наработку, месячную наработку и т. п.

Свойство электрической машины сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки называется **безотказностью**.

Одним из количественных показателей безотказности является *вероятность безотказной работы* — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникает. Количественно вероятность безотказной работы определяется статистическим отношением числа машин, безотказно проработавших в течение времени t, к общему числу работоспособных машин N в начале наблюдения, т. е. в момент времени $t=0$:

$$P(t) = \frac{N - n(t)}{N}, \tag{1.1}$$

где $n(t)$ — количество машин, отказавших за время наблюдения t.

Вероятность безотказной работы является убывающей функцией времени и может изменяться от нуля (при $t=\infty$) до единицы (при $t=0$). Из этого следует, что с увеличением заданной наработки t вероятность безотказной работы $P(t)$ уменьшается и наоборот — с уменьшением наработки t $P(t)$ возрастает. Вероятность безотказной работы электрической машины определяется при наработке, она должна быть не менее указанной в технической документации. Например, для асинхронных двигателей общего назначения современных серий основного исполнения установлена вероятность безотказной работы $P(t) \geqslant 0{,}9$ при наработке $t = 10\,000$ ч, а для двигателей постоянного тока $P(t) \geqslant 0{,}9$ при $t=2000$ ч.

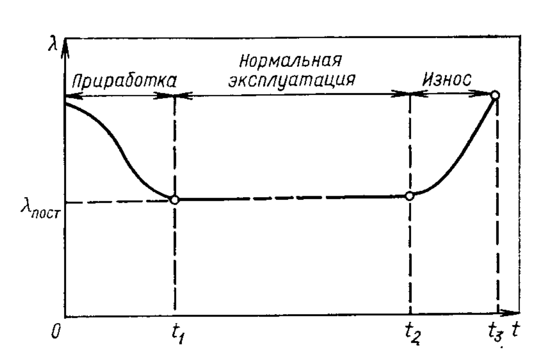


Рис. 1.2. Интенсивность отказов для трех периодов работы электрической машины

Практикой эксплуатации электрических машин установлено три периода, характеризуемых различной интенсивностью отказов λ. На рис. 1.2 эти периоды отмечены характерным изломом графика $\lambda=f(t)$. В течение первого периода, называемого **приработкой**, выявляются скрытые дефекты, в основном технологического характера, не обнаруженные службой технического контроля завода-изготовителя. Этот период характерен случайными отказами. С течением времени эксплуатации машины интенсивность отказов снижается и при t_1 достигает некоторого постоянного значения $\lambda_{пост}$. С этого времени наступает **нормальная эксплуатация** (t_1—t_2). Отказы в этот период носят случайный характер — происходят в основном по причине нарушения условий эксплуатации: перегрузка машины, изменение внешних факторов (допустимых значений температуры, влажности, вибраций и т.п.), попадание внутрь машины металлической стружки или воды и т. д. Период нормальной эксплуатации является наиболее продолжительным (до 15—25 тыс. ч). Затем наступает **период износа** (старения). Этому периоду (t_2—t_3) соответствует нарастание интенсивности отказов, имеющих в основном постепенный характер, так как они обусловлены главным образом старением изоляции, износом подшипников, коллектора, контактных колец и т. п.

Многолетние наблюдения за эксплуатацией электрических машин и анализ причин их отказов показали: в асинхронных двигателях 85—95 % всех отказов происходит вследствие выхода из строя обмотки статора, 5—8 % — из-за выхода из строя подшипниковых узлов, остальное приходится на прочие причины, в основном механические повреждения. В машинах постоянного тока 65 % всех отказов происходит из-за выхода из строя обмотки якоря, 15 % — обмотки возбуждения, 9 % — коллектора, 11 % — подшипников и по причине других механических повреждений.

Преобладание отказов по причине выхода из строя обмоток статора и якоря в машинах средней мощности объясняется в основном спецификой укладки всыпных обмоток, когда проводники располагаются в пазу беспорядочно, образуя неровности и перехлесты. В процессе укладки проводников в пазы их при-

ходится уплотнять, что является причиной возможных механических повреждений изоляции обмоточных проводов и приводит к межвитковым коротким замыканиям. Более надежными являются обмотки из проводов прямоугольного сечения, так как они укладываются в открытые и полуоткрытые пазы в определенном порядке.

Существенное влияние на надежность электрических машин оказывают вибрации, вызванные неуравновешенностью вращающихся частей машин. Эти вибрации передаются на подшипники, ускоряя их износ, и на обмотки, изоляция которых, особенно в лобовых частях, испытывая механические усилия, постепенно изнашивается и выходит из строя.

Причиной частых отказов электрических машин является также их применение в условиях, не соответствующих исполнению по способам защиты и монтажа, а также климатическим условиям эксплуатации. Поэтому значительный резерв повышения надежности электрических машин заложен в разработке и внедрении различных специализированных исполнений, рассчитанных на специфические условия работы.

Для предупреждения отказов машин, вызванных их перегрузкой, в наиболее ответственных случаях применяют встроенную температурную защиту обмотки статора, отключающую машину от сети при значительном превышении температуры обмотки над температурой охлаждающей среды.

Большое влияние на надежность машины оказывает качество ее изготовления. Эффективным средством повышения качества изготовления электрических машин является тщательная отработка технологичности машины при ее проектировании, предполагающая применение наиболее совершенных и перспективных технологических процессов с высокой степенью механизации.

Глава вторая

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИИ

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В процессе работы, транспортирования и хранения электрическая машина испытывает целый комплекс механических и тепловых воздействий, а также действие солнечной радиации, пыли, коррозионно-активных элементов и т. д. Механические нагрузки обусловлены центробежными силами и вибрациями, реакцией передачи, электромагнитными силами, возникающими в рабочем режиме и особенно значительными при переходных процессах. Тепловые воздействия связаны с окружающей средой и различными видами потерь в самой машине. Наиболее опасны тепловые воздействия на электрическую изоляцию, в которой при температурах, превышающих допустимую, процесс теплового старения развивается весьма интенсивно.

При выборе материалов исходят не только из их физических свойств (механической прочности, электрической проводимости, нагревостойкости и т. п.), но и из их цены и дефицитности. Если

физические свойства материалов определяют энергетические показатели машины, ее надежность и технологичность, то их стоимость существенно влияет на экономичность машины.

Материалы, применяемые в электромашиностроении, разделяются на конструкционные, активные и электроизоляционные.

Конструкционные материалы применяются для изготовления деталей машины, преимущественным назначением которых является восприятие и передача механических нагрузок, а также обеспечение требуемой степени защиты, охлаждения, смены смазки и т. д. (станины, подшипниковые щиты, валы, жалюзи, уплотнители, вентиляторы и т. д.). В качестве конструкционных материалов используют сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы, пластмассы. Подробнее вопросы выбора конструкционных материалов изложены в главах, посвященных конструированию электрических машин.

Активные материалы служат для создания в электрической машине необходимых условий для протекания электромагнитных процессов и подразделяются на проводниковые и магнитные. Электроизоляционные материалы предназначены для электрической изоляции обмоток и других токоведущих частей машины.

Некоторые детали и сборочные единицы машины работают в сложных физических условиях и выполняют функции как конструкционных, так и активных (например, станины машин постоянного тока). К таким материалам предъявляются смешанные требования. Например, хорошие магнитные свойства материала или его электропроводящие свойства должны сочетаться с механической прочностью.

2.2. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Магнитные материалы применяют для изготовления магнитопроводов. Одним из основных требований, предъявляемых к магнитным материалам, является высокая магнитная проницаемость, т. е. чтобы требуемый магнитный поток в машине создавался возможно меньшей МДС обмотки возбуждения.

Некоторые элементы магнитопроводов электрических машин (сердечники статоров машин переменного тока, якорей машин постоянного тока и т. п.) подвержены перемагничиванию, что вызывает потери энергии на вихревые токи и на перемагничивание (гистерезис).

К магнитным материалам, из которых изготавливаются такие элементы магнитопроводов, предъявляются еще и требования минимальных потерь на перемагничивание и повышенное удельное электрическое сопротивление. Последнее способствует уменьшению потерь на вихревые токи.

В настоящее время наилучшим магнитным материалом, удовлетворяющим всем перечисленным требованиям, является тонколистовая электротехническая сталь. Широкий диапазон электромагнитных свойств электротехнической стали достигается изменением содержания кремния. Обычно сталь с меньшим содержанием

кремния имеет меньшую магнитную проницаемость и бо́льшие удельные потери, но и большее значение индукции насыщения. С повышением содержания кремния возрастает хрупкость стали, что создает определенные трудности при штамповке (образование трещин). Это обстоятельство ограничивает применение высоколегированных электротехнических сталей для изготовления сердечников при небольших размерах зубцов и пазов. По способу прокатки стали подразделяются на холоднокатаные и горячекатаные.

Тонколистовая холоднокатаная электротехническая сталь выпускается в виде рулонов, листов и резаной ленты. Горячекатаная электротехническая сталь выпускается в листах. Поставка холоднокатаной стали в рулонах и резаных лентах позволяет автоматизировать штамповку, что значительно повышает производительность труда и уменьшает отходы.

Обозначение марки стали состоит из четырех цифр:

первая — класс по виду прокатки и структурному состоянию:

1 — горячекатаная;

2 — холоднокатаная изотропная (имеющая одинаковые магнитные свойства вдоль и поперек направления проката);

3 — холоднокатаная анизотропная (магнитные свойства вдоль направления проката лучше, чем поперек);

вторая — содержание кремния:

0 — до 0,4 % (нелегированнная);

1 — 0,4—0,8 %;

2 — 0,8—1,8 %;

3 — 1,8—2,8 %;

4 — 2,8—3,8 %;

5 — 3,8—4,8 %;

третья — группа по основному нормируемому показателю:

0 — удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,7/50}$);

1 — удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,5/50}$);

2 — удельные потери при магнитной индукции 1,0 Тл и частоте 400 Гц ($P_{1,0/400}$);

6 — магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$);

7 — магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля 10 А/м ($B_{1,0}$);

четвертая — порядковый номер типа стали.

Для определения удельных потерь в стали при магнитной индукции B и частоте f, отличающихся от значений, приведенных в ГОСТ, следует воспользоваться формулой пересчета

$$P_{B\,f} = P_{1,5\,50}\,(B/1,5)^2\,(f/50)^{\beta}, \qquad (2.1)$$

где β — показатель степени, зависящий от марки электротехнической стали (см. § 6.1).

Элементы магнитопровода, изготавливаемые из листовой электротехнической стали, имеют шихтованную конструкцию, т. е. выполняются в виде пакета выштампованных листов, изолированных друг от друга изоляционной пленкой (лак, оксидная пленка), которая служит для уменьшения потерь на вихревые токи. Заполнение такого пакета сталью зависит от толщины листов стали, толщины изоляционной пленки, качества поверхности листов и усилия запрессовки и учитывается коэффициентом заполнения пакета сталью (k_c), равным отношению сечения чистой стали (без изоляции) ко всему сечению пакета.

В современных единых сериях асинхронных двигателей (4А) и машин постоянного тока (2П) преимущественное применение получили холоднокатаные изотропные стали марок 2013, 2312 и 2411.

Холоднокатаные изотропные стали обладают высокими магнитными свойствами, хорошим качеством поверхности, малой разнотолщинностью. Применение этих сталей позволит существенно улучшить энергетические показатели и уменьшить массу электрических машин.

Для изготовления сердечников главных полюсов применяют листовую конструкционную сталь толщиной 1—2 мм либо анизотропную холоднокатаную электротехническую сталь марки 3411 толщиной 1 мм. При изготовлении сердечников из анизотропной стали необходимо, чтобы продольная ось полюса совпадала с направлением проката стали. Применение холоднокатаной стали марки 3411 для сердечников главных полюсов позволяет уменьшить магнитное рассеяние добавочных полюсов и ослабить размагничивающее действие реакции якоря. Объясняется это тем, что магнитный поток обмотки якоря, проходя «поперек» сердечников главных полюсов, т. е. перпендикулярно направлению проката электротехнической стали, испытывает повышенное магнитное сопротивление, что и ведет к уменьшению этого потока.

Станины машин постоянного тока изготавливают из стальных цельнотянутых труб либо гнут и сваривают из стального листа марки Ст3. В некоторых случаях станины делают шихтованными из электротехнической стали.

2.3. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Требования к электроизоляционным материалам весьма разнообразны, так как их свойства во многом определяют эксплуатационную надежность, габаритные размеры, массу и стоимость машины.

Одним из важнейших свойств электроизоляционного материала является *нагревостойкость* — способность материала выполнять функции при воздействии рабочих температур в течение времени, определяемого сроком службы электрической машины.

По нагревостойкости все электроизоляционные материалы разделяются на семь классов, при этом каждому классу нагревостойкости соответствует своя предельно допустимая температура:

Класс нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	C
Предельно допустимая температура, °С	90	105	120	130	155	180	>180

Класс нагревостойкости А. Волокнистые материалы из бумаги, хлопка, шелка, древесины и т. д., пропитанные жидкими диэлектриками либо погруженные в них. К этому классу относятся также изоляция эмальпроводов на основе масляных и полиамидно-резольных лаков, полиамидные пленки, бутилкаучуковые и другие материалы. Пропитывающими веществами для данного класса материалов являются трансформаторное масло, масляные и асфальтовые лаки и другие вещества соответствующей нагревостойкости. К данному классу относятся лакобумаги, лакоткани, пленкоэлектрокартон, гетинакс, текстолит.

В настоящее время электроизоляционные материалы класса нагревостойкости А имеют ограниченное применение в электрических машинах.

Класс нагревостойкости Е. Изоляция эмальпроводов и электроизоляционные материалы на основе полиуретановых, эпоксидных, полиэфирных смол и других синтетических материалов аналогичной нагревостойкости.

Класс нагревостойкости В. Материалы на основе неорганических диэлектриков (слюда, асбест, стекловолокно) и клеящих, пропиточных и покровных лаков и смол повышенной нагревостойкости органического происхождения с содержанием органических веществ по массе не более 50 %. К этому классу относятся материалы на основе щепаной слюды: миканит, микалента, микафолий. К классу В относятся различные синтетические материалы: полиэфирные смолы на основе фталевого ангидрида, фторопласт-3, некоторые полиуретановые смолы, пластмассы с неорганическим наполнителем.

Класс нагревостойкости F. Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, но с применением органических лаков и смол, модифицированных кремнийорганическими и другими нагревостойкими смолами. Изоляция этого класса не должна содержать хлопчатой бумаги, целлюлозы и шелка.

Класс нагревостойкости Н. Те же материалы, что и в классе F, но с соответствующими по нагревостойкости кремнийорганическими лаками и смолами.

Эксплуатация изоляционного материала в соответствии с температурами, указанными для каждого класса нагревостойкости, обеспечивает ему длительный срок службы (20—25 лет) без заметной потери изоляционных и механических свойств. Если материал использовать при температурах, превышающих указанные для соответствующего класса нагревостойкости, то срок службы изоляции резко сокращается. Это объясняется интенсивным тепловым старением материала, сопровождаемым утратой им электроизоляционных свойств и механической прочности. Экспериментально показано, что при повышении температуры на 10 °С против установленной классом нагревостойкости для материалов класса А и В срок службы изоляции сокращается примерно вдвое. Примерно такое же влияние оказывает превышение температуры и на материалы других классов нагревостойкости. Поэтому важнейшей

задачей разработчика электрической машины является правильный выбор класса нагревостойкости изоляционных материалов, т. е. класс нагревостойкости выбранного материала должен соответствовать фактической рабочей температуре частей машины: если эта температура выше допустимой для изоляции, то срок службы машины резко сократится; если же температура частей машины намного ниже допустимой, то машина будет недостаточно использована, а это значит, что ее габаритные размеры и стоимость будут неоправданно завышены. Исключение составляют машины, к которым предъявляется требование повышенной надежности. При проектировании этих машин допускается применение изоляции более высокого класса нагревостойкости, чем это требуется фактической температурой.

Электроизоляционные материалы должны обладать также высокой теплопроводностью, обеспечивающей необходимый отвод теплоты от обмоток машины, должны быть эластичными и механически прочными, т. е. не разрушаться как в процессе изготовления машины, так и при ее транспортировке и эксплуатации, когда изоляция обмоток подвергается воздействию ударных и вибрационных нагрузок, электродинамических усилий и т. д.

Обычно электрическая изоляция обмотки машины состоит из нескольких видов электроизоляционных материалов, образующих систему изоляции. Непременным условием надежной работы такой системы является совместимость всех ее составляющих.

Кроме того, изоляционные материалы должны обладать требуемыми теплостойкостью, влагостойкостью, холодостойкостью и т. д.

Изоляция обмоток по своим функциям подразделяется на пазовую (корпусную), витковую и проводниковую. Проводниковая изоляция — это изоляция обмоточного провода. Витковая изоляция — это изоляция, нанесенная на виток. Витковая изоляция обычно применяется лишь в высоковольтных машинах. Пазовую (корпусную) изоляцию либо накладывают на катушки (секции) обмотки, либо устанавливают в пазы машины до укладки обмотки. Кроме того, в пазы машины помещают прокладки: на дно паза, под клин и между слоями обмотки.

Надежность машины при эксплуатации в значительной степени зависит от пропитки как обмотки в целом, так и отдельных изоляционных материалов. Требования к применяемым для этой цели пропиточным лакам чрезвычайно разнообразны и заключаются в следующем: достаточная изоляционная прочность; хорошая пропитывающая способность; влагостойкость и химостойкость; при рабочих температурах лак не должен давать трещин и терять эластичность; в некоторых случаях лак должен обладать хорошими клеящими свойствами. Кроме того, пропиточные составы должны быть совместимы с изоляционными материалами и не должны вызывать заметного снижения их теплопроводности.

Удовлетворить всему комплексу этих требований очень трудно. Поэтому иногда применяют комбинированную пропитку в различных лаках, каждый из которых в какой-то степени обладает одним из требуемых свойств.

В современных электрических машинах получили широкое применение *композиционные* электроизоляционные материалы. Такой материал представляет собой сочетание полимерных пленок с различными гибкими изоляционными материалами на основе синтетических волокон. Указанные компоненты соединяют между собой клеящими составами. Функции компонентов различны: пленка принимает на себя электрическую и механическую нагрузки, а волокнистые материалы придают композиции необходимые технологические свойства — жесткость, упругость, надежную связь между поверхностью пазовой изоляции и прилегающими к ней поверхностью катушек с одной стороны и поверхностью магнитопровода с другой. Непременным условием при подборе компонентов является их полная совместимость.

Композиционные материалы обладают высокими механическими свойствами, что позволяет поставлять их в рулонах и применять при механизированном способе укладки обмоток. Примерами композиционного материала могут служить пленкосинтокартоны марок ПСК-Ф и ПСК-ЛП, состоящие из полиэтилентерефталатной пленки (ПЭТФ), оклеенной с двух сторон бумагой из фенилонового волокна (ПСК-Ф) или бумагой из лавсанового волокна с пропиткой (ПСК-ЛП) или без нее (ПСК-Л).

Конкретные виды электроизоляционных материалов и их маркировка приведены в примерах конструкции изоляции пазовой и лобовой частей обмоток электрических машин.

2.4. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

В качестве проводниковых материалов в электромашиностроении широко применяется электролитическая медь и реже рафинированный алюминий. Необходимо иметь в виду, что основной параметр меди — электрическая проводимость — в значительной степени зависит от наличия даже небольшого количества примесей. Поэтому медь, предназначенная для электрических проводов, не должна содержать более 0,1 % примесей. При холодной протяжке медь подвергается наклепу, становится более твердой и ее удельное электрическое сопротивление возрастает. Отжиг возвращает меди первоначальные свойства.

Для заливки короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей применяют алюминий. В результате заливки в стержнях и короткозамыкающих кольцах появляются воздушные включения, а при заливке под давлением алюминий приобретает волокнистую структуру. Все это ведет к некоторому увеличению электрического сопротивления клетки.

Известно, что с ростом температуры удельное электрическое сопротивление меди и алюминия увеличивается. В соответствии с ГОСТ 183-74 расчетная рабочая температура принимается равной 75 °С для обмоток с изоляцией классов нагревостойкости А, Е и В, 115 °С для обмоток с изоляцией классов нагревостойкости F и Н.

В табл. 2.1 для некоторых проводниковых материалов приведены значения удельного электрического сопротивления ρ при различных температурах.

Таблица 2.1

Наименование	Удельное электрическое сопротивление, 10^{-9} Ом·м, при температуре, °С			Плотность, 10^3 кг/м³
	20	75	115	
Медный провод	17,5	21,3	24,4	8,9
Алюминиевый провод	29,4	35,7	40,0	2,6—2,7
Литая алюминиевая клетка	36,6	46,5	48,8	2,6—2,7

Для изготовления коллекторных пластин применяют холоднокатаную медь (ГОСТ 3568-70), или медь с присадкой кадмия — кадмиевую медь (ГОСТ 4134-75), обладающую большей механической прочностью и меньшим износом на истирание.

Контактные кольца изготавливают из стали, чугуна или меди. Для осуществления скользящего контакта с коллектором или кон-

Таблица 2.2

Марка щетки	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Допустимая плотность тока, А/мм²	Допустимая скорость, м/с	Давление на щетку, кПа
Графитные				
Г3	1,9	11	25	20—25
611М	2,0	12	40	20—25
6110М	2,0	15	90	12—22
Электрографитированные				
ЭГ2А	2,6	10	45	20—25
ЭГ2АФ	2,2	15	90	15—21
ЭГ4	2,0	12	40	15—20
ЭГ8	2,4	10	40	20—40
ЭГ14	2,5	11	40	20—40
ЭГ51	2,2	12	60	20—25
ЭГ61	3,0	13	60	35—50
ЭГ71	2,2	12	40	20—25
ЭГ74	2,7	15	50	17,5—25
ЭГ74АФ	2,3	15	60	15—21
ЭГ85	2,3	15	50	17,5—35
Металлографитные				
МГ2	0,5	20	20	18—23
МГ4	1,1	15	20	20—25
МГСО	0,2	20	20	18—23

Таблица 2.3

Марка провода	Класс нагревостойкости изоляции	Наименование провода
ПЭТ-155	F	Провод медный круглый с полиэфиримидной изоляцией
ПЭТП-155	F	То же прямоугольный
ПЭТВ	B	Провод медный круглый с полиэфирной изоляцией
ПЭТВП	B	То же прямоугольный
ПСД	F	Провод медный круглый или прямоугольный с двухслойной изоляцией из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком
ПСДК	H	То же с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком
ПЭТВСД	B	Провод медный прямоугольный с нагревостойкой эмалевой изоляцией и двухслойной обмоткой стекловолокном, подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком

тактными кольцами в электрических машинах применяют *щетки*. Сырьем для изготовления щеток являются углеродсодержащие твердые компоненты (графит, сажа, кокс), связующие вещества (каменноугольная смола или пек) и металлические порошки (медь, олово, свинец). Применяя различные виды сырья и используя определенные технологические процессы изготовления, получают большую номенклатуру щеток с различными свойствами. Все щетки, применяемые в электрических машинах, разделяются на группы: металлографитную, угольно-графитную, графитную, электрографитированную. Щетки каждой группы характеризуются общностью состава, методов изготовления и областей применения.

В табл. 2.2 приведены технические данные щеток, получивших наибольшее применение в электрических машинах общего назначения.

Графитные щетки применяются в генераторах и двигателях с облегченными условиями коммутации и на контактных кольцах. Электрографитированные щетки применяются в генераторах и двигателях со средними и затрудненными условиями коммутации и на контактных кольцах.

К *обмоточным проводам*, применяемым в электромашиностроении, предъявляются требования: малая толщина изоляционного слоя, высокая механическая прочность при одновременной гибкости провода и эластичности изоляции, электрическая прочность и нагревостойкость изоляционного покрытия, высокая теплопроводность, стойкость к растворителям.

Для изолирования проволоки применяются волокнистая, эмалевая или эмальволокнистая виды изоляции.

Наибольшее применение получили обмоточные провода, изолированные слоем органической эмали (эмалированные провода), и

провода с волокнистой изоляцией. При выборе обмоточного провода обычно отдают предпочтение проводам с эмалевой изоляцией, у которых толщина изоляционного покрытия в 1,5—3 раза меньше, чем у проводов с волокнистой и эмальволокнистой изоляцией.

Класс нагревостойкости эмалированных проводов зависит от свойств пропиточного лака. Например, провода марок ПЭТП и ПЭТВП, пропитанные лаком МЛ-92 и ПЭ933, имеют класс нагревостойкости B, а провода марки ПЭТ-155 и ПЭТП-155, пропитанные лаками ПЭ933 и КО-916к, имеют класс нагревостойкости F. В табл. 2.3 приведены марки и наименования обмоточных проводов, получивших наибольшее применение в электрических машинах общего назначения.

Глава третья

ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ И ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

3.1. СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Преобразование энергии в электрической машине всегда связано с потерями. При этом все виды потерь в конечном итоге преобразуются в теплоту, которая вызывает нагревание машины. Номинальная мощность машины при ее заданных размерах и условиях работы ограничивается превышением температуры ее частей, которое не должно быть больше допустимых значений.

Температура частей электрической машины существенно зависит от эффективности их охлаждения: чем интенсивнее отвод теплоты, тем ниже их температура, а следовательно, тем выше номинальная мощность машины. Наибольшее применение в электрических машинах общего назначения получили два способа охлаждения — естественное и искусственное.

Машины с естественным охлаждением не имеют вентиляторов или каких-либо других специальных устройств для охлаждения машины или ее отдельных частей. Циркуляция воздуха внутри такой машины создается вследствие вентилирующего действия вращающихся частей машины и явления конвекции (перенос теплоты потоками воздуха внутри машины).

Машины с искусственным охлаждением снабжены специальными устройствами — вентиляторами, создающими движение газа (воздуха или водорода), который, соприкасаясь с нагретыми частями машины, отбирает от них теплоту, т. е. охлаждает их. Значительную группу электрических машин составляют машины с самовентиляцией, у которых вентилятор расположен на валу либо предусмотрены лопатки на вращающихся частях машины (обмоткодержателях, короткозамыкающих кольцах). Самовентиляция может быть наружной и внутренней. При наружной самовентиляции (способ охлаждения IC0141) обдувается внешняя ребристая

поверхность машины (рис. 3.1, *а*). Машину в этом случае выполняют закрытой (исполнение IP44), т. е. в ее корпусе не делают каких-либо специальных отверстий для сообщения внутренней полости машины с внешней средой.

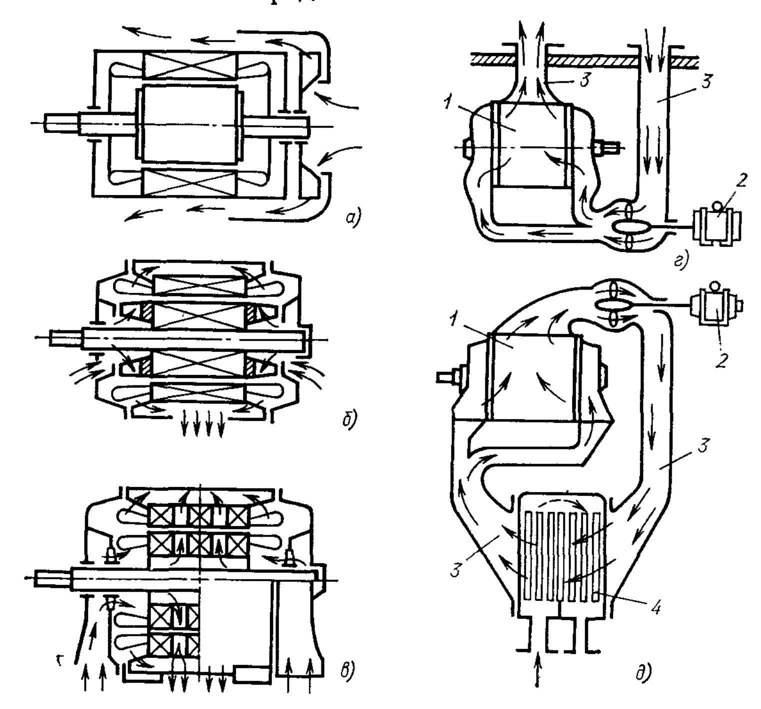


Рис. 3.1. Системы вентиляции электрических машин:

а — самовентиляция наружная; *б* и *в* — самовентиляция внутренняя; *г* — независимая разомкнутая самовентиляция; *д* — независимая замкнутая вентиляция; *1* — охлаждаемая машина; *2* — двигатель вентилятора; *3* — трубопровод; *4* — газоохладитель

При внутренней самовентиляции (способ охлаждения IC01) в корпусе и подшипниковых щитах машины имеются специальные отверстия (исполнения IP22 и IP23), через которые хладагент проникает внутрь машины, охлаждает ее, а затем выбрасывается наружу (рис. 3.1, *б* и *в*).

В зависимости от направления движения охлаждающих потоков газа внутри машины различают вентиляцию радиальную и аксиальную.

При радиальной вентиляции (рис. 3.2, *а*) преобладает радиальное направление движения охлаждающего газа внутри машины (перпендикулярно оси вращения машины), а при аксиальной вентиляции—аксиальное (вдоль оси вращения машины) (рис. 3.2, *б*).

Для повышения эффективности охлаждения в некоторых электрических машинах предусматривают вентиляционные каналы для прохода охлаждающего газа. При радиальной вентиляции сердечники статора и ротора подразделяются на несколько пакетов (рис.

3.2, *а*), в промежутки между которыми к крайним листам пакетов приваривают распорки, называемые ветреницами. При вращении ротора ветреницы создают движение потоков охлаждающего газа через вентиляционные каналы.

Радиальная вентиляция обеспечивает равномерное охлаждение машины. Однако выполнение радиальных вентиляционных каналов усложняет конструкцию машины и ведет к увеличению ее габари-

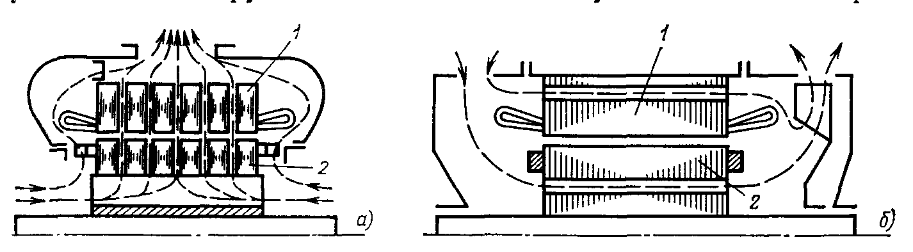


Рис. 3.2. Радиальная (*а*) и аксиальная (*б*) системы вентиляции:

1 — статор; *2* — ротор

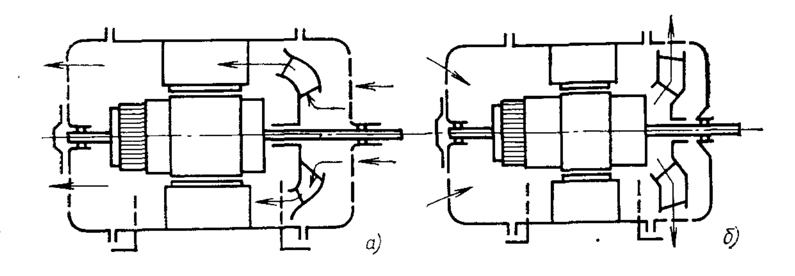


Рис. 3.3. Нагнетательная (*а*) и вытяжная (*б*) системы вентиляции

тов и стоимости. При аксиальной вентиляции в машине предусматривают аксиальные вентиляционные каналы (рис. 3.2, *б*). Конструктивно выполнение аксиальных вентиляционных каналов проще, чем радиальных. Однако аксиальная вентиляция не обеспечивает равномерного охлаждения машины, так как охлаждающий газ, продвигаясь вдоль машины, постепенно нагревается.

Иногда в машине применяют радиально-аксиальную вентиляцию (рис. 3.1, *в*).

В машинах средней и большой мощности применяют независимую (принудительную) систему вентиляции (рис. 3.1, *г* и *д*), когда охлаждающий газ подается в машину специальным вентилятором с собственным электроприводом (способы охлаждения IC05 и IC37).

Система вентиляции может быть разомкнутой, когда газ (воздух) нагнетается в машину, а затем выбрасывается наружу (рис. 3.1, *г*), и замкнутой, когда в герметически закрытой машине циркулирует постоянный объем газа (воздуха или водорода), охлаждаемого в специальном газоохладителе (рис. 3.1, *д*). Замкнутую

систему вентиляции обычно применяют в машинах большой мощности.

Как при аксиальной самовентиляции, так и при независимой вентиляции от направления, в котором проходит газ в машине по отношению к вентилятору различают вентиляцию нагнетательную (рис. 3.3, *а*) и вытяжную (рис. 3.3, *б*).

При нагнетательной вентиляции воздух сначала попадает на вентилятор, а затем проходит по вентиляционным каналам машины и выбрасывается наружу. Вследствие трения о лопатки вентилятора происходит подогрев воздуха, поступающего внутрь машины, примерно на 3—8 °С. Для компенсации этого подогрева необходимо увеличить на 15—20 % расход воздуха.

При вытяжной вентиляции в машину поступает воздух, имеющий температуру охлаждающей среды. Исходя из изложенного, предпочтение следует отдавать вытяжной вентиляции.

3.2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Для обеспечения надежной работы электрической машины в течение установленного срока службы необходимо, чтобы температура отдельных частей машины (обмотки, магнитопровода, коллектора и т. д.) не превышала допустимых значений, установленных ГОСТ 183-74.

Предельно допустимые превышения температуры частей электрических машин общего назначения для классов нагревостойкости изоляции B, F и H при различных методах измерения и при температуре охлаждающей среды 40 °С указаны в табл. 3.1. Предельно допустимая температура для какой-либо части машины определяется суммой превышения температуры по табл. 3.1 и температуры охлаждающей среды 40 °С.

При проектировании электрической машины после электромагнитного расчета и определения всех размеров машины необходимо выполнить тепловой расчет. Задача этого расчета состоит в определении превышения температуры различных частей машины. Результаты теплового расчета показывают правильность выбора электромагнитных нагрузок и подтверждают целесообразность применения в машине электроизоляционных материалов выбранного класса нагревостойкости.

Электрические машины общего назначения обычно предназначаются для продолжительного режима работы. Для этих машин ведут расчет установившегося теплового режима, когда превышение температуры всех частей машины не меняется и теплота, выделяющаяся в машине, полностью рассеивается в окружающую среду.

Известно, что распространение теплоты происходит от источника теплоты в направлении уменьшения температуры. При этом тепловой поток проходит через различные материалы, теплопроводность которых (способность пропускать тепловой поток) неоди-

Таблица 3.1

Части электрических машин	Изоляционный материал класса нагревостойкости								
	B			F			H		
	Предельные длительно допустимые температуры, °С, при измерении методами								
	термометра	сопротивления	температурных индикаторов	термометра	сопротивления	температурных индикаторов	термометра	сопротивления	температурных индикаторов
Обмотки переменного тока машин мощностью 5000 кВ·А и выше или с длиной сердечника 1 м и более	—	80	80	—	100	100	—	125	125
Обмотки переменного тока машин мощностью менее 5000 кВ·А или с длиной сердечника менее 1 м[1]	70	80	—	85	100	—	105	125	—
Обмотки возбуждения машин постоянного или переменного тока с изолированными поверхностями	70	80	—	85	100	—	105	125	—
Якорные обмотки, соединенные с коллектором	70	80	—	85	100	—	105	125	—
Обмотки возбуждения неявнополюсных машин	—	90	—	—	110	—	—	135	—
Однорядные обмотки возбуждения с неизолированными поверхностями	90	90	—	110	110	—	135	135	—
Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев, и компенсационные обмотки	80	80	—	100	100	—	125	125	—
Изолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	80	—	—	100	—	—	125	—	—
Неизолированные обмотки непрерывно замкнутые на себя; сердечники и другие стальные части, не соприкасающиеся с изолированными обмотками	Превышение температуры этих частей не должно достигать значений, которые создавали бы опасность повреждения самих элементов и соседних частей								
Сердечники и другие стальные части, соприкасающиеся с изолированными обмотками[2]	80	—	80	100	—	100	125	—	125

Части электрических машин	Изоляционный материал класса нагревостойкости. Предельные длительно допустимые температуры, °С, при измерении методами								
	B			F			H		
	термометра	сопротивления	температурных индикаторов	термометра	сопротивления	температурных индикаторов	термометра	сопротивления	температурных индикаторов
Коллекторы и контактные кольца незащищенные и защищенные	80	—	—	80	—	—	100	—	—

[1] Для стержневых обмоток ротора асинхронных машин допускается по согласованию с заказчиком иметь превышения температуры, указанные для однорядных обмоток возбуждения.

[2] Превышения температур не должны превосходить допустимых значений для соприкасающихся обмоток.

накова. Теплопроводность материала определяет перепад температуры в нем.

Перепадом температуры в металлах пренебрегают из-за их высокой теплопроводности, а учитывают перепад температуры лишь в изоляции и между охлаждаемой поверхностью и охлаждающей средой.

Перепад температуры, °С, в изоляции обмотки прямо пропорционален толщине изоляции $\delta_{из}$ и обратно пропорционален площади сечения изоляции $S_{из}$ в направлении, перпендикулярно направлению теплового потока

$$\Delta\Theta_{из} = Q\delta_{из}/\lambda_{из} S_{из}, \qquad (3.1)$$

где Q — количество теплоты, проходящей через изоляцию в единицу времени.

Если применена композиционная изоляция, то общий перепад температуры в изоляции обмотки определяется суммой превышений температур отдельных слоев:

$$\Delta\Theta_{из} = \sum_{1}^{n} \Delta\Theta_{из} = (Q/S_{из})(\delta_{из1}/\lambda_{из1} + \ldots + \delta_{изn}/\lambda_{изn}), \qquad (3.2)$$

где $\lambda_{из1}, \ldots, \lambda_{изn}$ — коэффициенты теплопроводности изоляционных слоев.

Теплопроводность воздуха намного меньше теплопроводности изоляционных материалов. Поэтому наличие воздушных прослоек в многослойной изоляции приводит к снижению теплопроводности изоляции машины. Устранению этого нежелательного явления способствует пропитка обмоток.

Отвод теплоты с поверхности нагретого тела происходит лучеиспусканием (излучением теплоты в окружающее пространство) и

передачей теплоты конвекцией, обусловленной движением воздуха относительно охлаждаемой поверхности. Превышение температуры нагретой поверхности относительно температуры охлаждающего воздуха с учетом всех видов теплопередачи, °С,

$$\Delta\Theta_{пов} = Q_{пов}/S_{пов}\,\alpha_{пов}, \qquad (3.3)$$

где $Q_{пов}$ — тепловой поток через поверхность охлаждения; $S_{пов}$ — площадь охлаждаемой поверхности; $\alpha_{пов}$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности.

Значения коэффициентов $\alpha_{пов}$ определяют экспериментально на различных видах электрических машин.

Эксперименты по исследованию тепловых процессов в электрических машинах, а также многочисленные тепловые расчеты показывают, что физическая картина тепловых процессов в электрических машинах очень сложна и точное определение распределения температур путем теплового расчета практически невозможно. Поэтому при проектировании электрической машины ограничиваются приближенным тепловым расчетом с применением ряда коэффициентов, значения которых установлены экспериментально, в результате исследования тепловых процессов большого числа различных электрических машин.

Приближенный тепловой расчет машины основан на ряде допущений, основными из которых являются следующие:

1) температура обмоток в рассматриваемом объеме одинакова;

2) температура стали статора и ротора (якоря) во всем объеме одинакова;

3) потери, выделяющиеся в активной части статора и ротора (якоря), отводятся через цилиндрическую поверхность сердечников и поверхность вентиляционных каналов;

4) потери в лобовых частях обмотки статора и ротора (якоря) отводятся через цилиндрическую поверхность этих частей.

Упрощенные тепловые расчеты электрических машин приведены в соответствующих главах, посвященных проектированию конкретных видов электрических машин.

3.3. РАСЧЕТ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ВЕНТИЛЯТОРА

В электрических машинах общего назначения преимущественное применение получили два способа искусственного охлаждения — внутренняя самовентиляция (IC01) машин защищенного исполнения (IP22 и IP23) и наружная самовентиляция (IC0141) машин закрытого исполнения (IP44).

Принудительное движение воздуха при указанных способах охлаждения создается *центробежным вентилятором* с радиальным расположением лопаток (рис. 3.4). Основными размерами такого вентилятора являются наружный диаметр $D_н$, внутренний диаметр $D_{вн}$, ширина лопаток $b_л$ и их число $N_л$. Вентилятор жестко закреплен на валу машины, так что при ее работе он вращается вместе с ротором (якорем). При этом перемещение охлаждающего газа — воздуха — происходит под действием центробежных сил, воздействующих на воздух, попавший на лопатки вентилятора. Эти силы, будучи направленными перпендику-

лярно оси вращения вентилятора, создают разряжение воздуха на стороне внутреннего диаметра вентилятора $D_{вн}$ и создают избыточное давление (напор) на стороне наружного диаметра $D_н$.

Расчет центробежного вентилятора состоит в определении его размеров $D_н$, $D_{вн}$, $b_л$ и $N_л$, которые при заданной частоте вращения ротора (якоря) n обеспечат требуемый расход охлаждающего воздуха $Q_в$, м³/с.

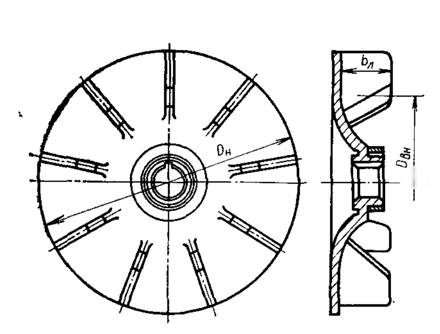


Рис. 3.4. Центробежный вентилятор

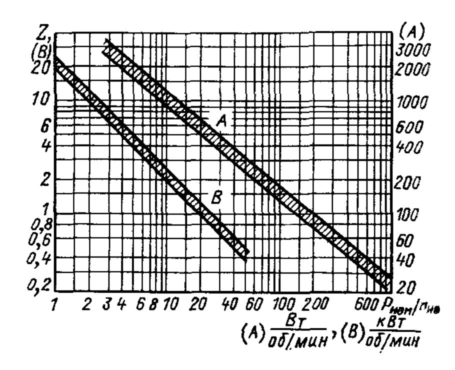


Рис. 3.5. Зависимость аэродинамического сопротивления Z, Па·с²/м⁶, вентиляционной системы машины от $P_{ном}/n_{ном}$

При внутренней самовентиляции (IC01)

$$Q_в = 0{,}45\cdot10^{-3}\,\Sigma P_в/\Delta\Theta_в, \tag{3.4}$$

где $\Sigma P_в$ — суммарные потери в машине, отводимые в воздух внутри двигателя, Вт; $\Delta\Theta_в$ — превышение температуры воздуха на выходе из машины над температурой воздуха на входе в машину, °С.

При наружной самовентиляции (IC0141)

$$Q_в = 0{,}9\cdot10^{-3}\,m\Sigma P_в\sqrt{n\cdot10^{-3}\,D_н\cdot10^{-2}}/\Delta\Theta_в. \tag{3.5}$$

Значения коэффициента m принимают в зависимости от высоты оси вращения машины h и числа полюсов $2p$:

h, мм	56—132	56—132	160—400	160—400
$2p$	2	4—8	2	4—12
m	2,6	1,8	3,3	2,5

Ниже приведен упрощенный расчет центробежного вентилятора для электрических машин общего назначения.

Наружный диаметр вентилятора $D_н$ принимают в зависимости от конструкции машины и системы вентиляции: при аксиальной вентиляции $D_н \approx 0{,}9\,D_{1н}$, где $D_{1н}$ — наружный диаметр сердечника статора, мм. При радиальной вентиляции $D'_н = D_2$, где D_2 — наружный диаметр ротора (якоря), мм. При наружном обдуве машины (IC0141) обычно принимают $D_н \approx (1{,}6\div1{,}8)h$.

Окружная скорость лопаток по наружному диаметру вентилятора, мс,

$$v_н = \pi D_н n/60\cdot10^3. \tag{3.6}$$

Поперечное сечение межлопаточного канала на выходе воздуха, мм²,

$$S_в = 2\cdot10^6\,Q_в/0{,}45 v_н. \tag{3.7}$$

Окружная скорость лопаток по внутреннему диаметру вентилятора, м/с,

$$v_{вн} = \sqrt{v_н^2 - 1{,}85 Z Q_в^2}; \tag{3.8}$$

здесь Z — аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети электрической машины, Па·с²/м⁶. Расчет этого сопротивления трудоемок, и его точное определение весьма затруднено. Поэтому при практических расчетах вентиляции иногда пользуются упрощенными методами для определения Z. Так, для двигателей с наружной самовентиляцией (IC0141) аэродинамическое сопротивление

$$Z = 12{,}3\,(n\cdot10^{-3})^2\,(D_{1н}\cdot10^{-2})^2/Q_в^2. \tag{3.9}$$

Для электрических машин с внутренней аксиальной самовентиляцией (IC01) аэродинамическое сопротивление Z определяют по рис. 3.5.

Внутренний диаметр вентилятора, мм,

$$D_{вн} = 60\cdot10^3\,v_{вн}/\pi n. \tag{3.10}$$

Для центробежных встроенных вентиляторов отношение диаметров должно быть $D_н/D_{вн} = 1{,}2\div1{,}5$; для вентиляторов наружного обдува $D_н/D_{вн} = 2{,}0\div2{,}5$. Число лопаток вентилятора

$$N_л = (6\div10)\,D_н/(D_н - D_{вн}). \tag{3.11}$$

В целях уменьшения вентиляционного шума рекомендуется применять число лопаток нечетным.

Площадь одной лопатки вентилятора, мм²,

$$S_л = S_в\,(D_н - D_{вн})/2\pi D_н. \tag{3.12}$$

Ширину лопаток выбирают в зависимости от принятой их формы в соответствии с полученным при конструировании машины значением площади $S_л$. Конструкция центробежного вентилятора должна быть жесткой, а отверстия в подшипниковых щитах для входа и выхода воздуха должны иметь скругленные края.

Глава четвертая

ГЛАВНЫЕ РАЗМЕРЫ И СООТНОШЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

4.1. ГЛАВНЫЕ РАЗМЕРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Главными размерами электрической машины называются внутренний диаметр сердечника статора (для асинхронных и синхронных машин) или наружный диаметр якоря (для машин постоянного тока) D и расчетная длина статора или якоря l_i. Определение главных размеров машины является важнейшим этапом ее проектирования, так как правильно выбранные главные размеры во многом определяют рациональное использование активных материалов в машине.

Главные размеры зависят от ряда факторов: номинальных данных машины (мощности, частоты вращения), заданной высоты оси

вращения, выбранного класса нагревостойкости системы изоляции и других параметров, значения которых влияют на выбор электрической и магнитной нагрузок. Следует помнить, что определение главных размеров электрической машины — это задача, имеющая несколько решений. Поэтому для получения некоторых данных, в частности электромагнитных нагрузок, важно умело воспользоваться многолетним опытом проектирования электрических машин.

Расчетная (электромагнитная) мощность P_i, кВ·А, для асинхронных и синхронных машин определяется по формуле

$$P_i = m_1 E_1 I_1 \cdot 10^{-3}, \quad (4.1)$$

где m_1 — число фаз обмотки статора; E_1 и I_1 — ЭДС, В, и ток, А, обмотки фазы статора.

Для машин постоянного тока расчетная мощность, кВт, равна

$$P_i = E_2 I_2 \cdot 10^{-3}, \quad (4.2)$$

где E_2 и I_2 — ЭДС, В, и ток, А, обмотки якоря.

Электродвижущая сила обмотки статора, В,

$$E_1 = 4k_B f_1 k_{об1} w_1 \Phi, \quad (4.3)$$

где k_B — коэффициент формы кривой поля в зазоре, при синусоидальном поле $k_B = 1{,}11$; f_1 — частота тока в обмотке, Гц:

$$f_1 = pn/60; \quad (4.4)$$

$k_{об1}$ — обмоточный коэффициент для основной гармоники ЭДС; w_1 — число последовательно соединенных витков фазы обмотки (для машины постоянного тока — число витков в параллельной ветви обмотки якоря); Φ — основной магнитный поток, Вб:

$$\Phi = \alpha_i l_i \tau B_\delta, \quad (4.5)$$

здесь τ — полюсное деление:

$$\tau = \pi D/2p; \quad (4.6)$$

α_i — расчетный коэффициент полюсного перекрытия, равный отношению расчетной полюсной дуги b_δ к полюсному делению τ, или отношению среднего значения магнитной индукции в зазоре $B_{\delta ср}$ к ее максимальному значению B_δ:

$$\alpha_i = b_\delta/\tau = B_{\delta ср}/B_\delta. \quad (4.7)$$

Обозначим число последовательно соединенных проводников, расположенных во всех пазах статора (якоря), $N_1 = 2m_1 w_1$. Тогда полный ток пазового слоя равен

$$I_1 N_1 = I_1 2m_1 w_1.$$

Полный ток пазового слоя, приходящийся на единицу длины окружности статора (якоря), называется *линейной нагрузкой*, А/м,

$$A_1 = 2m_1 w_1 I_1/\pi D \quad (4.8)$$

Из (4.8) ток можно представить как

$$I_1 = \pi D A_1/2m_1 w_1. \quad (4.9)$$

Подставляя в (4.1) выражения (4.3) и (4.9), а также учитывая (4.4) и (4.5), получаем

$$P_i = (10^{-12}/6{,}1)\, k_B k_{об1} n \alpha_i l_i D^2 B_\delta A_1, \quad (4.10)$$

или

$$D^2 l_i n/P_i = 6{,}1 \cdot 10^{12}/k_B k_{об1} \alpha_i B_\delta A_1; \quad (4.11)$$

здесь D и l_i — в мм; n — в об/мин; P_i — в кВ·А или в кВт; B_δ — в Тл; A_1 — в А/м.

Выражение (4.11) называется *основным расчетным уравнением электрической машины.* Введем понятие о машинной постоянной Арнольда

$$C_A = D^2 l_i/(P_i/n). \quad (4.12)$$

Произведение $D^2 l_i$ пропорционально активному объему машины ($D^2 l_i \sim V$), а величина P_i/n пропорциональна электромагнитному моменту машины ($P_i/n \sim M$). Следовательно, машинная постоянная C_A дает представление о расходе активных материалов, приходящихся на единицу электромагнитного момента машины.

Преобразовав (4.11), получим

$$D^2 l_i = \frac{P_i \cdot 6{,}1 \cdot 10^{12}}{k_B k_{об1} \alpha_i n B_\delta A_1}. \quad (4.13)$$

Из (4.13) видно, что при заданных значениях мощности P_i и электромагнитных нагрузок B_δ и A_1 расход активных материалов в машине тем меньше, чем больше частота вращения n. Другими словами, быстроходные машины меньше по габаритным размерам и легче тихоходных.

Анализ (4.11) и (4.12) показывает, что хотя величину C_A и называют постоянной, она зависит от ряда величин и в первую очередь от магнитной B_δ и электрической A_1 нагрузок машины. Обычно при проектировании машины ее мощность и частота вращения задаются. Поэтому активный объем машины ($V \sim D^2 l_i$) зависит от величины электромагнитных нагрузок B_δ и A_1. Например, если задаться пониженными значениями B_δ и A_1, то получим машину с большими габаритными размерами, но с высоким КПД, низкой рабочей температурой и, следовательно, с весьма продолжительным сроком службы. Другими словами, мы получим машину с большой затратой материалов при малых эксплуатационных расходах. Можно поступить и наоборот — задаться повышенными значениями B_δ и A_1 и получить машину с малыми габаритными размерами, но с низким КПД, высокой рабочей температурой, а следовательно, с малым сроком службы. Такая машина при малой затрате материалов будет иметь высокие эксплуатационные расходы. Вполне очевидно, что оба решения неприемлемы.

Практикой проектирования электрических машин установлены рекомендуемые значения электромагнитных нагрузок B_δ и A_1, которыми и следует пользоваться при расчете электрической машины. Однако следует помнить, что эти значения B_δ и A_1 с течением

времени корректируют обычно в сторону увеличения. Это объясняется применением в машинах новых магнитных, изоляционных и других материалов, более эффективных систем охлаждения, совершенствованием технологических процессов изготовления машин и других мероприятий, направленных на лучшее использование активного объема машины.

Рекомендации по выбору значений B_δ и A_1, а также различных коэффициентов, входящих в (4.11), приведены в последующих главах при рассмотрении расчета конкретных видов электрических машин.

Выбирая электромагнитные нагрузки B_δ и A_1, задаваясь значениями коэффициентов α_i, k_B, $k_{об1}$ и используя заданные значения

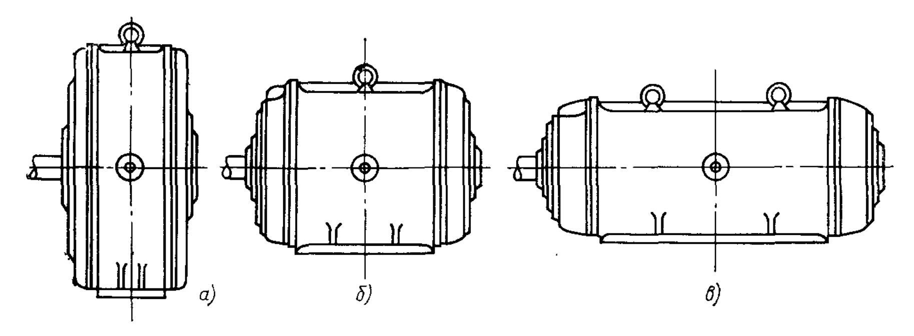


Рис. 4.1. Электрические машины при разных соотношениях главных размеров

мощности и частоты вращения, по (4.13) определяем произведение $D^2 l_i$. Однако полученное значение $D^2 l_i$ еще не определяет главные размеры машины, так как произведению $D^2 l_i$ соответствует бесчисленное множество различных значений D и l_i. Следовательно, определение главных размеров машины сводится к выбору соотношений этих размеров (l_i/D). Известно, что одному и тому же объему машины можно придать разные формы: машина может быть «короткой» (рис. 4.1, *а*), «средней» (рис. 4.1, *б*) либо «длинной» (рис. 4.1, *в*). Если в техническом задании на проектирование машины указан какой-либо из габаритных размеров — диаметр или длина машины, то, задавшись одним главным размером, определяют другой. Если известен диаметр D (при заданной высоте оси вращения), то расчетная длина по (4.13), мм,

$$l_i = \frac{6{,}1 \cdot 10^{12} P_i}{k_B k_{об1} \alpha_i n D^2 B_\delta A_1}. \qquad (4.14)$$

После этого необходимо проверить, соответствует ли отношение главных размеров

$$\lambda = l_i/D \qquad (4.15)$$

рекомендуемым значениям, полученным на основании обобщения результатов проектирования аналогичных электрических машин.

При этом полезно знать достоинства и недостатки «длинных» ($\lambda > 1{,}4$) и «коротких» ($\lambda < 0{,}4$) машин.

В «длинных» машинах использование активных материалов более эффективно, т. е. при одинаковых мощности и частоте вращения «длинные» машины требуют при изготовлении меньше активных материалов, чем «короткие». У «длинных» машин лучше динамические свойства (меньше время разгона и торможения), но они хуже охлаждаются (а следовательно, имеют более высокие рабочие температуры); у них больше прогиб вала, а у коллекторных «длинных» машин к тому же хуже коммутация (из-за повышенного значения реактивной ЭДС коммутируемых секций), что снижает надежность машины.

4.2. ВЫБОР РАСЧЕТНОГО ВАРИАНТА МАШИНЫ

Расчет электрической машины представляет собой задачу, имеющую несколько решений, т. е. при одинаковых исходных данных можно получить несколько расчетных вариантов. Выбор расчетного варианта должен вестись с учетом комплекса экономических и технических требований.

Одним из основных критериев оценки расчетного варианта машины являются сумма затрат по ее изготовлению и эксплуатационные расходы за нормативный срок окупаемости машины. При этом предполагается, что в сравниваемых расчетных вариантах полностью выполнены требования технического задания.

Эксплуатационные расходы определяются главным образом энергетическими показателями машины: КПД и коэффицентом мощности. Затраты на изготовление машины определяются в основном стоимостью активных материалов: проводниковых, магнитных и изоляционных. Для асинхронных двигателей стоимость этих материалов составляет примерно 70 %, а для машин постоянного тока — 75 % стоимости всех материалов, из которых изготовлена машина. Поэтому сравнение расчетных вариантов проектируемой машины можно вести по значениям энергетических показателей (КПД, коэффициент мощности) и по массе активных материалов (обмоточная и коллекторная медь, алюминий короткозамкнутого ротора, магнитные материалы). Уточненную массу деталей, сборочных единиц и машины в целом определяют по окончании проектирования машины, используя ее рабочие чертежи. Оценку расчетного варианта можно вести по предварительным значениям массы активных материалов, вычисленных по следующим формулам.

1. Масса меди обмоточного провода распределенной обмотки статора, фазного ротора или якоря, кг,

$$G_{м.о} = 8{,}9\, Z n_{эл}\, q_{эл}\, (l_{ср}/2) \cdot 10^{-6}, \qquad (4.16)$$

где Z — число пазов сердечника; $n_{эл}$ — число элементарных проводников в одном пазу; $q_{эл}$ — площадь поперечного сечения эле-

ментарного проводника, мм²; $l_{ср}$ — средняя длина катушки (секции) распределенной обмотки, м.м

2. Масса меди полюсных катушек, кг,

$$G_{м,к} = 8{,}9 \cdot 2p w_к l_{ср,к}\, n_{эл} q_{эл} \cdot 10^{-6}, \tag{4.17}$$

где $w_к$ — число витков в полюсной катушке; $l_{ср,к}$ — средняя длина витка одной полюсной катушки, мм.

3. Масса меди коллектора, кг,

$$G_{м.кол} = 5{,}25 D_к^{1,5}\, l_к \cdot 10^{-5}, \tag{4.18}$$

где $D_к$ и $l_к$ — диаметр и длина коллектора, мм;

4. Масса алюминия короткозамкнутой клетки ротора, кг,

$$G_{ал} = 2{,}7\,[Z_2 q_{ст} l_{ст} + 2\pi D_{кл,ср} q_{кл} + 1{,}1 N_л (l_л - l_{кл}) h_л b_л] \cdot 10^{-6}, \tag{4.19}$$

где $q_{ст}$ и $l_{ст}$ — площадь поперечного сечения стержня, мм², и длина стержня (ротора), мм; $D_{кл,ср}$ и $q_{кл}$ — средний диаметр короткозамкнутого кольца (мм) и площадь поперечного сечения кольца (мм²); $l_л$, $h_л$ и $b_л$ — соответственно длина, высота и толщина лопатки, мм; $N_л$ — количество вентиляционных лопаток на роторе.

5. Масса стали сердечника, кг:

статора машины переменного тока

$$G_{c1} = 7{,}8\left[0{,}785\,(D_{1н}^2 - D_1^2) - S_{п1} Z_1\right] l_i k_{c1} \cdot 10^{-6}, \tag{4.20}$$

где $D_{1н}$ и D_1 — наружный и внутренний диаметры сердечника статора, мм; $S_{п1}$ — площадь паза, мм²; l_i — расчетная длина сердечника статора, мм; k_{c1} — коэффициент заполнения сердечника статора сталью;

ротора асинхронного двигателя или якоря машины постоянного тока

$$G_{c2} = 7{,}8\left[0{,}785\,(D_2^2 - D_{2вн}^2 - n_{к,а} d_{к,а}^2) - S_{п2} Z_2\right] l_i k_{c2}, \tag{4.21}$$

где D_2 и $D_{2вн}$ — наружный и внутренний диаметры сердечника статора (якоря), мм; $S_{п2}$ — площадь паза ротора (якоря), мм²; k_{c2} — коэффициент заполнения сердечника ротора (якоря) сталью; $n_{к,а}$ и $d_{к,а}$ — количество и диаметр (мм) аксиальных вентиляционных каналов;

явновыраженного полюса без компенсационной обмотки

$$G_{c,m} = 8{,}5 l_m b_m h_m k_{c1} \cdot 10^{-6}, \tag{4.22}$$

где l_m, b_m и h_m — длина, ширина и высота главного полюса, мм; добавочного полюса

$$G_{а,д} = 7{,}8 l_д b_д h_д k_{c1} \cdot 10^{-6}, \tag{4.23}$$

где $l_д$, $b_д$ и $h_д$ — длина, ширина и высота добавочного полюса, мм; если полюсы массивные (нешихтованные), то коэффициент заполнения полюса сталью $k_{c1} = 1$.

Для оценки расчетного варианта проектируемой электрической машины целесообразно воспользоваться удельной материалоемкостью машины, представляющей собой массу машины, приходящуюся на 1 кВт ее номинальной мощности, кг/кВт,

$$K_G = G'/P_{ном}. \tag{4.24}$$

Предварительное значение массы электрической машины общего назначения, кг, можно определить, пользуясь эквивалентной плотностью электрической машины q_G:

электрические машины переменного тока (бесколлекторные)

$$G' = q_G D_{1н}^2 l_i \cdot 10^{-6}; \tag{4.25}$$

электрические машины постоянного тока коллекторные

$$G' = q_G D_2^2 l_i \cdot 10^{-6}. \tag{4.26}$$

Эквивалентную плотность электрической машины, кг/кВт, принимают в зависимости от вида машин и их исполнения по способу защиты:

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором исполнения IP44	13
То же исполнения IP23	12
Асинхронные машины с фазным ротором исполнения IP23	13
Машины постоянного тока	43

Удельная материалоемкость проектируемой машины не должна превышать значений K_G для существующей машины такого же исполнения и близкой к проектируемой по номинальной мощности и частоте вращения.

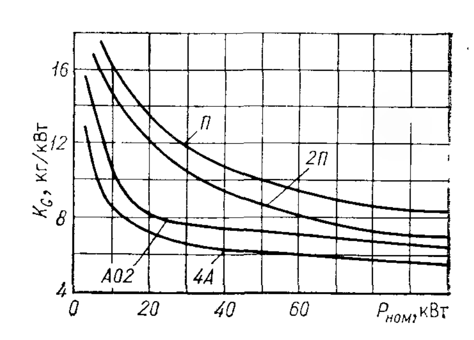


Рис. 4.2. Удельная материалоемкость машин мощностью до 100 кВт

Сравнение K_G для ряда электрических машин возрастающей единичной мощности показывает, что с ростом номинальной мощности $P_{ном}$ масса на 1 кВт снижается (рис. 4.2). Удельная материалоемкость K_G электрических машин серий 4А и 2П меньше, чем машин серий АО2 и П.

4.3. СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ ПОДОБНЫХ МАШИН

Габаритные размеры и масса электрической машины определенным образом зависят от ее номинальной мощности и частоты вращения. Эта зависимость имеет общий характер для всех видов электрических машин. Электродвижущая сила обмотки статора (якоря) пропорциональна числу витков обмотки w, магнитному потоку Φ и частоте вращения n:

$$E \sim w \Phi n. \tag{4.27}$$

В свою очередь магнитный поток

$$\Phi = BS_м,$$

где B — средняя магнитная индукция в пределах площади сечения магнитопровода $S_м$.

Таким образом, можно записать

$$E \sim wBS_м n. \quad (4.28)$$

Ток статора (якоря) можно представить как произведение плотности тока Δ на площадь поперечного сечения эффективного проводника обмотки $q_{эф}$:

$$I = \Delta q_{эф}. \quad (4.29)$$

Используя (4.28) и (4.29), напишем следующее выражение расчетной мощности:

$$P_i \sim \Delta q_{эф} wBS_м n. \quad (4.30)$$

Произведение $q_{эф}w = S_{об}$ представляет собой общую площадь поперечного сечения всех витков обмотки. Тогда

$$P_i \sim \Delta BS_м S_{об} n. \quad (4.31)$$

Площади $S_м$ и $S_{об}$ пропорциональны квадрату линейного размера l, поэтому

$$S_м S_{об} \sim l^2 l^2 \sim l^4. \quad (4.32)$$

Тогда

$$P_i \sim \Delta Bnl^4. \quad (4.33)$$

Если принять для ряда электрических машин Δ и B неизменными, то

$$P_i/n \sim l^4, \quad (4.34)$$

или

$$l \sim \sqrt[4]{P_i/n} \sim \sqrt[4]{M}, \quad (4.35)$$

где $M \sim P_i/n$ — электромагнитный момент машины.

Следовательно, в ряде машин возрастающей мощности, в которых плотность тока и магнитная индукция неизменны, линейные размеры машин меняются пропорционально корню четвертой степени из их электромагнитного момента. Если, к тому же этот ряд машин имеет постоянную частоту вращения, то линейные размеры машин меняются пропорционально корню четвертой степени из их расчетной мощности:

$$l \sim \sqrt[4]{P_i}. \quad (4.36)$$

Приведенная зависимость линейных размеров ряда электрических машин справедлива лишь для геометрически подобных машин, у которых $\Delta = \text{const}$ и $B = \text{const}$, а поэтому их размеры находятся в одинаковом отношении. Например, если машины 1 и 2 подобны, то для них справедливо равенство отношений одноименных

геометрических размеров (диаметров D, длин l, высоты h_z и ширины $b_п$ паза и т. д.)

$$D_1/D_2 = l_1/l_2 = h_{z1}/h_{z2} = b_{п1}/b_{п2}. \quad (4.37)$$

Масса G машины пропорциональна ее объему, т. е. кубу линейных размеров. Поэтому для ряда геометрически подобных машин можно записать

$$G \sim l^3 \sim \left(\sqrt[4]{P_i}\right)^3 \sim \sqrt[4]{P_i^3}. \quad (4.38)$$

Сумма потерь в машине ΣP при заданных значениях магнитной индукции и плотности тока пропорциональна массе машины, т. е.

$$\Sigma P \sim l^3 \sim \sqrt[4]{P_i^3}. \quad (4.39)$$

Важными экономическими показателями электрической машины являются масса и потери, приходящиеся на единицу мощности машины,

$$G/P_i \sim \Sigma P/P_i \sim \sqrt[4]{P_i^3}/P_i = 1/\sqrt[4]{P_i} \quad (4.40)$$

Следовательно, масса машины и сумма потерь на единицу мощности для геометрически подобных машин возрастающей мощности изменяются обратно пропорционально корню четвертой степени из расчетной мощности этих машин.

Рассмотрим отношение суммарных значений массы G_m и потерь ΣP_m нескольких (m) одинаковых машин к массе G_1 и потерям ΣP_1 единичной машины, мощность которой P_1 равна сумме мощностей m одинаковых машин, т. е. $P_1 = mP_i$:

$$\frac{G_m}{G_1} \sim \frac{\Sigma P_m}{\Sigma P_1} \sim \frac{m\sqrt[4]{P_i^3/m^3}}{\sqrt[4]{P_i^3}} = \frac{m}{\sqrt[4]{m^3}} = \sqrt[4]{m}. \quad (4.41)$$

Анализируя (4.41), можно сделать вывод: общие масса и потери нескольких машин всегда больше массы, стоимости и потерь одной машины той же суммарной мощности. Отсюда становится понятной тенденция к применению (там, где это возможно и целесообразно) электрической машины большой мощности вместо нескольких машин малой мощности. Так, при применении одной машины вместо двух меньшей мощности масса, стоимость и потери уменьшаются приблизительно на 16 %.

На практике рассмотренные закономерности не соблюдаются точно, так как при проектировании ряда электрических машин возрастающей мощности (серии) приходится отступать от законов геометрического подобия. Объясняется это тем, что потери в машинах растут пропорционально их объему, т. е. пропорционально кубу линейных размеров, в то время как поверхности охлаждения машин растут пропорционально квадрату этих размеров (пропорционально площади охлаждении). Поэтому в ряде геометрически подобных машин с увеличением мощности условия охлаждения

ухудшаются. В связи с этим приходится отступать от законов геометрического подобия и с возрастанием мощности машины увеличивать интенсивность ее охлаждения. Кроме того, при проектировании серии машин значения плотности тока Δ и магнитной индукции B в машинах разной мощности принимают неодинаковыми, так как руководствуются не законами подобия, а стремлением получить машину с высокими технико-экономическими показателями. Однако полученные закономерности позволяют определить общую тенденцию изменения массы и потерь мощности и могут быть использованы для приближенных расчетов.

Весьма важным при проектировании электрических машин является вопрос о зависимости габаритных размеров и массы машины от частоты вращения. Принимая частоту вращения $\bar{n}$ величиной переменной и используя выражения (4.35) и (4.38), получаем

$$l^3 \sim G \sim \sqrt[4]{P_i^3/n^3}. \quad (4.42)$$

Следовательно, при неизменной мощности машины, увеличение частоты вращения способствует уменьшению габаритных размеров и массы машины:

$$l^3 \sim G \sim 1/\sqrt[4]{n^3}. \quad (4.43)$$

В действительности уменьшение габаритных размеров и массы машины с увеличением номинальной частоты вращения происходит в большей степени, чем это следует из (4.43), так как с ростом $n_{ном}$ улучшаются условия охлаждения машины (при самовентиляции), что позволяет повысить электромагнитные нагрузки B и Δ, а следовательно, уменьшить габаритные размеры и массу машины.

Часть вторая

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Глава пятая

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В данной главе рассматривается электромагнитный расчет трехфазных асинхронных двигателей общего назначения закрытого обдуваемого (IP44) и защищенного (IP23) исполнений. Изложенная методика расчета основана на результатах проектирования основного исполнения асинхронных двигателей единой серии 4А.

Единая серия асинхронных двигателей 4А на напряжение до 1000 В охватывает диапазон номинальных мощностей от 0,06 до 400 кВт и включает двигатели 17 высот оси вращения от 50 до 355 мм. Серия включает помимо основного исполнения ряд модификаций и специализированных исполнений по условиям окружающей среды. Модификации: с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, с фазным ротором, многоскоростные, малошумные. Специализированные исполнения по условиям окружающей среды: тропическое, для районов с холодным климатом, химически стойкое и сельскохозяйственное.

Двигатели основного исполнения предназначены для работы в условиях умеренного климата, для привода механизмов, не предъявляющих особых требований к пусковым характеристикам, скольжению и другим параметрам. Они рассчитаны для включения в трехфазную сеть с частотой 50 Гц и напряжениями, указанными в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Номинальная мощность двигателя, кВт	Номинальное напряжение, В	Обмотка статора	
		Схема соединения	Число выводных концов
0,06—0,37	220; 380	Δ или Y	3
0,55—11	220; 380; 660		
15—110	220/380; 380/660	Δ/Y	6
132—400	380/660		6

Таблица 5.2

Высота оси вращения h, мм	Условное обозначение длины	Номинальная мощность, кВт, двигателей со степенью защиты IP44 при $2p$					
		2	4	6	8	10	12
50	A B	0,09 0,12	0,06 0,09	— —	— —	— —	— —
56	A B	0,18 0,25	0,12 0,18	— —	— —	— —	— —
63	A B	0,37 0,55	0,25 0,37	0,18 0,25	— —	— —	— —
71	A B	0,75 1,1	0,55 0,75	0,37 0,55	0,25 —	— —	— —
80	A B	1,5 2,2	1,1 1,5	0,75 1,1	0,37 0,55	— —	— —
90	L A B	3,0	2,2	1,5	0,75 1,1	—	—
100	S L	4,0 5,5	3,0 4,0	— 2,2	— 1,5	— —	— —
112	M A B	7,5	5,5	3,0 4,0	2,2 3,0	—	—
132	S M	— 11	7,5 11	5,5 7,5	4,0 5,5	—	—
160	S M	15 18,5	15 18,5	11 15	7,5 11	—	—
180	S M	22 30	22 30	— 18,5	— 15	— —	— —
200	M L	37 45	37 45	22 30	18,5 22	— —	— —
225	M	55	55	37	30	—	—
250	S M	75 90	75 90	45 55	37 45	— —	— —
280	S M	110 132	110 132	75 90	55 75	— —	— —

Продолжение табл. 5.2

Высота оси вращения h, мм	Условное обозначение длины	Номинальная мощность, кВт, двигателей со степенью защиты IP44 при $2p$					
		2	4	6	8	10	12
315	S M	160 200	160 200	110 132	90 110	55 75	45 55
355	S M	250 315	250 315	160 200	132 160	90 110	75 90

Примечания: 1. S, M, L — условные обозначения длины станины по расстоянию между осями отверстий под крепежные болты в лапах: S — малая длина; M — средняя длина; L — большая длина.
2. A, B — обозначения длины сердечника статора: A — первая длина; B — вторая длина.
3. Способ охлаждения двигателей со степенью защиты IP44—IC0141, а двигателей со степенью защиты IP23—IC01 (см. § 1.3).

Для поставок на экспорт двигатели могут быть изготовлены на частоту сети 60 Гц. Конструктивное исполнение двигателей по способу монтажа соответствует ГОСТ 2479-79 (см. § 1.3).

Для двигателей основного исполнения принята увязка установочных размеров с номинальными мощностями и синхронными частотами вращения (табл. 5.2, 5.3). Этой увязкой следует руководствоваться при проектировании асинхронных двигателей общего назначения.

Таблица 5.3

Высота оси вращения h, мм	Условное обозначение длины станины	Номинальная мощность, кВт, двигателей со степенью защиты IP23 при $2p$					
		2	4	6	8	10	12
160	S M	22 30	18,5 22	11 15	7,5 11	— —	— —
180	S M	37 45	30 37	18,5 22	15 18,5	— —	— —
200	M L	55 75	45 55	30 37	22 30	— —	— —
225	M	90	75	45	37	—	—
250	S M	110 132	90 110	55 75	45 55	— —	— —
280	S M	160 200	132 160	90 110	75 90	— —	— —
315	S M	— 250	200 250	132 160	110 132	75 90	55 75
355	S M	315 400	315 400	200 250	160 200	110 132	90 110

Примечание. См. примечания к табл. 5.2.

Двигатели с высотами оси вращения 50—132 мм имеют систему изоляции класса нагревостойкости B, а с высотами оси вращения 100—355 мм — класса нагревостойкости F.

Расчетный срок службы двигателей не менее 15 лет при наработке не более 40 тыс. ч. Наработка обмотки статора до первого капитального ремонта — не менее 20 тыс. ч. Вероятность безотказной работы двигателей — не менее 0,9 при наработке 10 тыс. ч.

Конструкции асинхронных двигателей серии 4А основного исполнения рассмотрены в гл. 7.

Задание на проектирование трехфазного асинхронного двигателя общего назначения должно содержать следующие данные: номинальную мощность $P_{ном}$, кВт; частоту сети f_1, Гц; число полюсов $2p$ или синхронную частоту вращения n_1, об/мин; тип обмотки ротора — короткозамкнутая или фазная; перегрузочную способность; отношение начального пускового момента к номинальному (для двигателей с короткозамкнутым ротором); отношение начального пускового тока к номинальному (для двигателей с короткозамкнутым ротором); исполнение двигателя по степени защиты (см. § 1.3); способ охлаждения (см. § 1.3); исполнение по способу монтажа (см. § 1.3); режим работы (продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный и т. п. по ГОСТ 183-74); класс нагревостойкости системы изоляции.

Проектирование двигателя начинают с выбора базовой модели, на которую ориентируются при выполнении всех расчетов и конструировании двигателя. При проектировании трехфазных асинхронных двигателей общего назначения мощностью до 400 кВт на напряжение до 1000 В за базовую модель следует принять один из типоразмеров двигателей серии 4А.

5.2. ВЫБОР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАГРУЗОК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ ДВИГАТЕЛЯ

Главными размерами асинхронного двигателя считают внутренний диаметр сердечника статора D_1 и его расчетную длину l_i, т. е. его длину без учета радиальных вентиляционных каналов:

$$l_i = l_1 - n_к b_к, \qquad (5.1)$$

где l_1 — конструктивная длина сердечника статора; $b_к$ и $n_к$ — ширина и число радиальных вентиляционных каналов соответственно.

При определении наружного $D_{1нар}$ и внутреннего D_1 диаметров сердечника статора трехфазных асинхронных двигателей на напряжение до 1000 В целесообразно воспользоваться данными серии 4А (табл. 5.4), так как принятые в этой серии диаметры соответствуют наиболее высоким технико-экономическим показателям двигателей.

При необходимости выбора значения $D_{1нар}$, не предусмотренного табл. 5.4, следует руководствоваться шириной ленты или рулона и припуском на штамповку $\Delta_{шт}$:

Таблица 5.4

h, мм	$D_{1нар}$, мм	$2p$	D_1, мм
50	81	2 4	41 46
56	89	2 4	48 55
63	100	2 4 6	54 61 65
71	116	2 4 6; 8	65 70 76
80	131	2 4 6; 8	74 84 88
90	149	2 4 6; 8	84 95 100
100	168	2 4 6; 8	95 105 113
112	191	2 4 6; 8	110 126 132
132	225	2 4 6; 8	130 145 158
160	272	2 4 6; 8	155 185 197
180	313	2 4 6; 8	171 211 220
200	349	2 4 6; 8	194 238 250
225	392	2 4 6; 8	208 254 284
250	437	2 4 6; 8	232 290 317
280	520	2 4 6 8 10	275 335 370 385 400
315*	520	2 4 6 8 10	275 335 370 385 400
315**	590	2 4 6 8 10; 12	310 380 425 440 450
355*	590	2 4 6 8 10; 12	310 380 425 440 450
355**	660	2 4 6 8 10; 12	345 435 470 490 500

* Исполнение IP44.
** Исполнение IP23.

Ширина ленты или рулона, мм . . .	До 95	107, 123	138—160	170—300	322—445	500—1000
Припуск на штамповку $\Delta_{шт}$, мм . . .	4	5	6	7	8	10

Возможны однорядная штамповка и двухрядная штамповка в шахматном порядке. Раскрой ленты или полосы должен предусматривать минимальные отходы. Стандартная ширина резаной

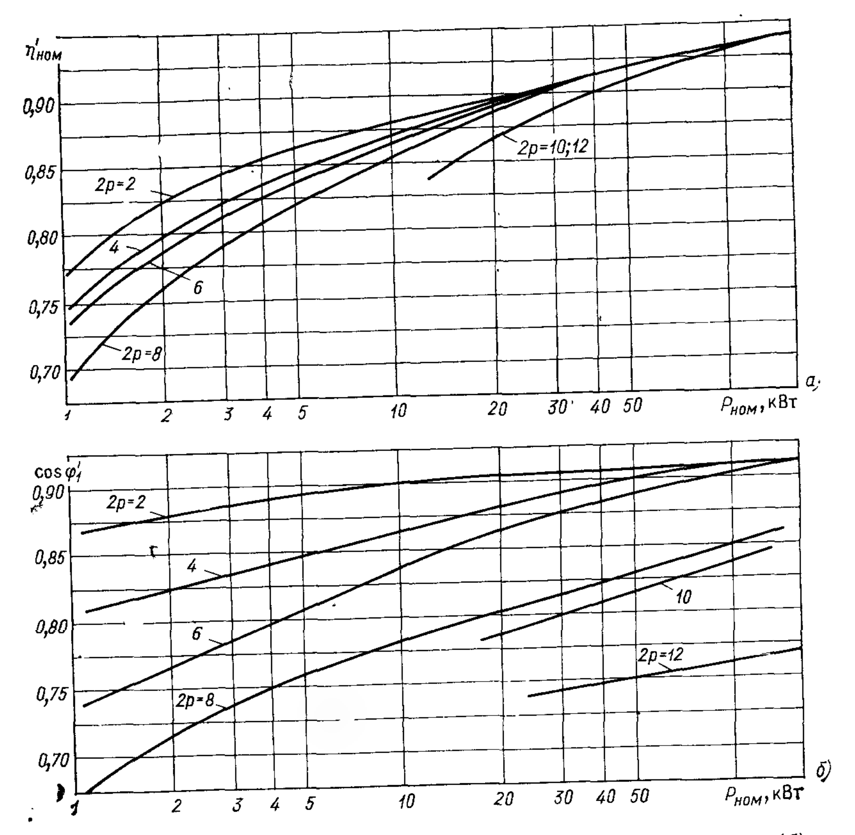


Рис. 5.1. Предварительные значения КПД (*а*) и коэффициента мощности (*б*) трехфазных асинхронных двигателей

ленты по ГОСТ 21427.2-75: 90, 95, 107, 123, 138, 140, 150, 160, 170, 175, 187, 200, 215, 226, 233, 250, 260, 280, 300, 322, 325, 360, 400, 445, 500 мм. Стандартная ширина рулонной стали: 500, 530, 600, 670, 750, 860, 1000 мм.

Расчетную мощность асинхронного двигателя, кВ·А, определяют по заданной номинальной мощности

$$P_i = P_{ном} k_E / \eta' \cos\varphi'_1, \tag{5.2}$$

где

$$k_E = E_1/U_1 = 0{,}90 \div 0{,}98, \tag{5.3}$$

при этом бо́льшие значения k_E соответствуют меньшему числу полюсов 2р; η' и $\cos\varphi'_1$ — предварительные значения КПД и коэффициента мощности в номинальном режиме (рис. 5.1).

Предварительные значения максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре B'_δ и линейной нагрузки A'_1 для асинхронных двигателей определяют по рис. 5.2. Принятое предварительное значение A'_1 следует привести в соответствие с классом нагревостойкости применяемой системы изоляции путем умножения A'_1 на коэффициент k_A, значения которого приведены в табл. 5.5 [1].

Таблица 5.5

h, мм	Рекомендуемый класс изоляции	Значения k_A при системе изоляции класса нагревостойкости		
		B	F	H
50—132	B	1,0	1,15	1,32
160—355	F	0,87	1,0	1,15

Предварительное значение обмоточного коэффициента для однослойных обмоток $k'_{об1} = 0{,}96$, для двухслойных обмоток при $2p=2$ $k'_{об1} = 0{,}80$, а при $2p=4$ $k_{об1} = 0{,}90 \div 0{,}96$.

При синусоидальном распределении магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя коэффициент полюсного перекрытия $\alpha_i = 2/\pi \approx 0{,}64$, а коэффициент формы поля $k_B = \pi/2\sqrt{2} = 1{,}11$. Однако в реальных условиях работы асинхронного двигателя из-за насыщения зубцов статора и ротора кривая распределения магнитной индукции в зазоре уплощается. В целях упрощения расчета асинхронных двигателей значения указанных коэффициентов принимают равными $\alpha'_i = 2/\pi$ и $k_B = \pi/2\sqrt{2}$, а искажение кривой распределения магнитной индукции в зазоре учитывают при расчете магнитных напряжений зубцов и спинки статора и ротора (см. § 5.7), используя специальные таблицы намагничивания для спинки и зубцов асинхронных двигателей (см. приложение П.2).

С учетом изложенного формула для определения расчетной длины статора асинхронного двигателя [см. (4.14)] имеет вид, мм,

$$l_i = \frac{8{,}66 \cdot 10^{12} P_i}{k'_{об1} n_1 D_1^2 B'_\delta A'_1}. \tag{5.4}$$

Полученное значение расчетной длины статора l_i следует округлить до 5 мм.

Расчет главных размеров двигателя заканчивают определением коэффициента длины

$$\lambda = l_i/D_1, \tag{5.5}$$

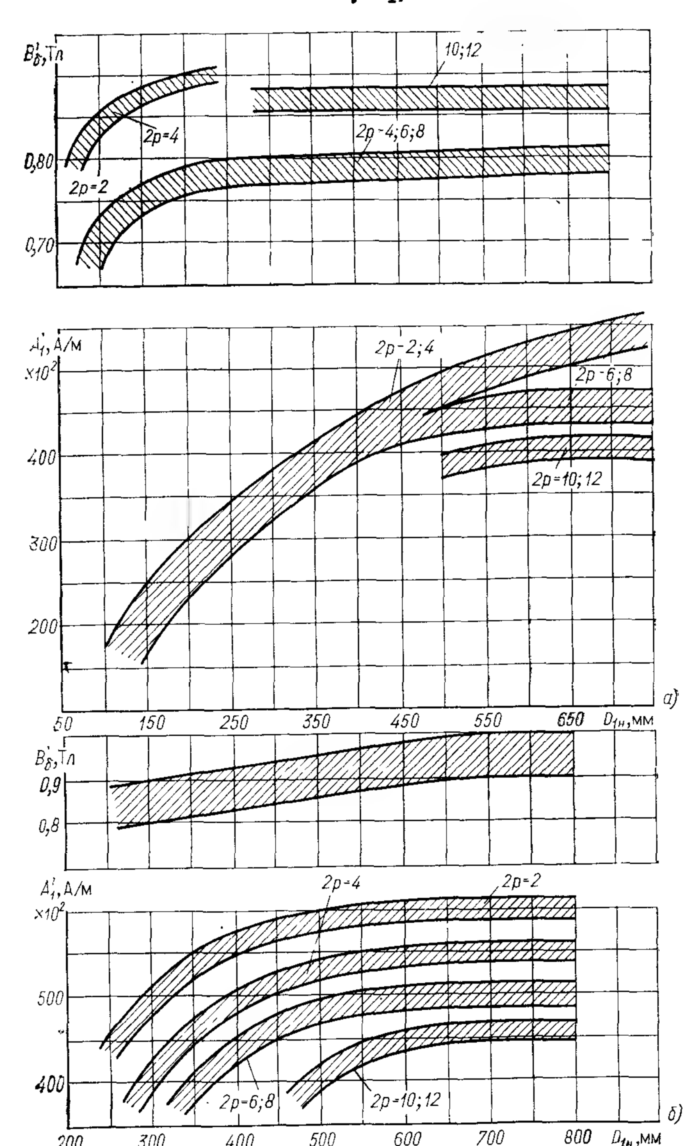


Рис. 5.2. Рекомендуемые значения максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре B'_δ и линейной нагрузки A'_1 для низковольтных асинхронных двигателей общего назначения:

а — со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141; *б* — со степенью защиты IP23 и способом охлаждения IC01

значения которого должны укладываться в диапазоне $\lambda = 0{,}5 \div 0{,}8$.

5.3. РАЗМЕРЫ АКТИВНОЙ ЧАСТИ ДВИГАТЕЛЯ

Сердечники статора и ротора набирают из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Наиболее прогрессивным является применение холоднокатаной изотропной стали. Благодаря большей магнитной проницаемости, меньшим удельным потерям, лучшему качеству поверхности по сравнению с горячекатаной электротехнической сталью холоднокатаная сталь способствует повышению энергетических показателей проектируемого двигателя. Рекомендации по применению холоднокатаных изотропных сталей в асинхронных двигателях [1] приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

h, мм	Марка стали	Способ изолировки листов		
		статора	ротора	
			короткозамкнутого	фазного
50—250	2013	Оксидирование	Оксидирование	Лакировка
280—355	2312	Лакировка	Оксидирование	Лакировка

Способ изолировки листов влияет на коэффициент заполнения сердечников сталью k_c: при оксидировании $k_c = 0{,}97$, при лакировке $k_c = 0{,}95$.

Радиальные вентиляционные каналы предусматривают в машинах защищенного исполнения, если длина сердечников статора и ротора превышает 450 мм. Радиальные вентиляционные каналы в асинхронных двигателях с короткозамкнутой литой клеткой ротора желательно не применять, так как это технологически затруднено необходимостью принятия специальных мер, предотвращающих затекание алюминия в эти каналы.

Воздушный зазор δ между статором и ротором существенно влияет на технико-экономические показатели двигателя. Так, с увеличением зазора δ возрастает намагничивающий ток статора, что ведет к снижению КПД и коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ двигателя. При уменьшении зазора уменьшается намагничивающий ток статора, что способствует повышению КПД и $\cos\varphi_1$. Однако если зазор сделать слишком маленьким, то резко возрастут добавочные (поверхностные и пульсационные) потери, что приведет к снижению КПД. Кроме того, при очень малом зазоре даже небольшая его неравномерность вызывает значительную силу одностороннего магнитного тяжения. Это является причиной значительного увеличения нагрузки на подшипники и вал двигателя и создает опас-

ность задевания ротора о внутреннюю поверхность статора, т. е. снижается надежность двигателя. Слишком маленький воздушный зазор нежелателен еще и потому, что снижается технологичность двигателя и повышается стоимость его изготовления из-за весьма жестких допусков на изготовление отдельных деталей двигателя и на его сборку. Из этого следует, что к выбору воздушного зазора нельзя подходить однозначно.

При проектировании асинхронных двигателей общего назначения на напряжение до 1000 В воздушный зазор целесообразно при-

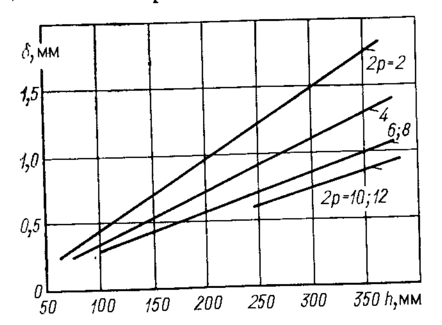


Рис. 5.3. Рекомендуемые значения воздушного зазора δ для трехфазных асинхронных двигателей общего назначения

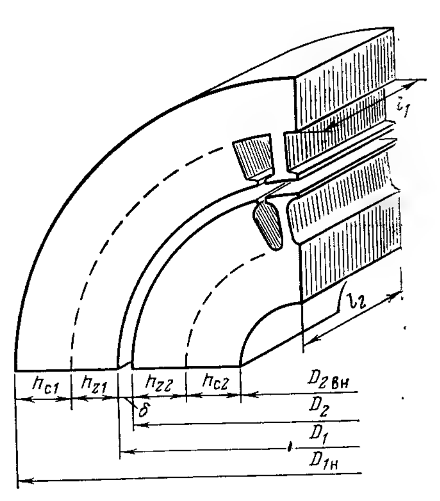


Рис. 5.4. Активная часть асинхронного двигателя

нимать по данным двигателей единой серии 4А (рис. 5.3). Основные размеры активной части асинхронного двигателя показаны на рис. 5.4.

Наружный диаметр сердечника ротора, мм

$$D_2 = D_1 - 2\delta. \tag{5.6}$$

Внутренний диаметр сердечника ротора $D_{2вн}$, мм, приближенно можно принять равным

$$D_{2вн} \approx (0{,}30 \div 0{,}35)\, D_2. \tag{5.7}$$

В дальнейшем, при расчете вала на жесткость (см. § 7.4), значение $D_{2вн}$ должно быть уточнено.

Конструктивная длина сердечника статора при отсутствии радиальных вентиляционных каналов равна его расчетной длине ($l_1 = l_i$). При наличии радиальных вентиляционных каналов конструктивная длина сердечника статора равна

$$l_1 = l_i + n_к b_к. \tag{5.8}$$

Число радиальных каналов $n_к$ при их ширине $b_к = 10$ мм, принимается такой, чтобы длина средних пакетов статора была 80—100 мм, а крайних несколько больше. Число и ширину радиальных

вентиляционных каналов в сердечнике ротора принимают такими же, что и в статоре.

Длину сердечника ротора l_2 при $h \leqslant 250$ мм принимают равной длине сердечника статора. В асинхронных двигателях с высотой оси вращения $h \geqslant 250$ мм длину сердечника ротора l_2 принимают больше длины сердечника статора на 5 мм для компенсации неточностей сборки двигателя.

В двигателях с высотой оси вращения $h \geqslant 180$ мм в сердечнике ротора предусматривают один ряд аксиальных вентиляционных каналов для улучшения охлаждения и уменьшения махового момента ротора. При выборе количества $n_{к,а}$ и диаметра $d_{к,а}$ этих каналов можно руководствоваться данными табл. 5.7.

На внутренней поверхности сердечника статора и наружной поверхности сердечника ротора имеются пазы, в которых располагают обмотки. Правильный выбор соотношения числа пазов и их размеров в значительной степени определяет свойства проектируемой машины и трудоемкость ее изготовления. С увеличением числа пазов в сердечнике форма кривой МДС в зазоре приближается к синусоиде, что способствует ослаблению высших гармоник ЭДС. Это ведет к улучшению энергетических показателей машины. Однако чрезмерно большое число пазов ухудшает заполнение пазов медью, усложняет изготовление штампов и снижает их стойкость, увеличивает трудоемкость операций, связанных с изолировкой пазов и ук-

Таблица 5.7

h, мм	$2p$	Исполнение двигателя по способу защиты			
		IP44		IP23	
		$n_{к,а}$	$d_{к,а}$, мм	$n_{к,а}$	$d_{к,а}$, мм
180	2	—	—	—	—
	4, 6, 8	10	18	10	18
200	2	10	12	10	12
	4	12	16	12	16
	6, 8	12	22	12	22
225	2	12	12	12	12
	4	12	20	12	20
	6, 8	12	25	12	25
250	2	12	15	12	15
	4	10	25	10	25
	6, 8	10	30	10	30
280, 315	2	12	20	—	—
	4	12	32	12	26
	6, 8, 10	12	32	12	40
355	2	12	20	—	—
	4, 6, 8, 10, 12	12	40	12	40

ладкой обмотки. Одновременно уменьшается сечение зубцов, разделяющих пазы.

Известно, что в воздушном зазоре машины происходит взаимодействие магнитных полей основной и высших гармоник. При этом поля высших гармоник создают дополнительные синхронные и асинхронные моменты, которые, накладываясь на основной электромагнитный момент, ухудшают рабочие и пусковые свойства двигателя. Значение этих моментов зависит от соотношения чисел пазов статора Z_1 и ротора Z_2.

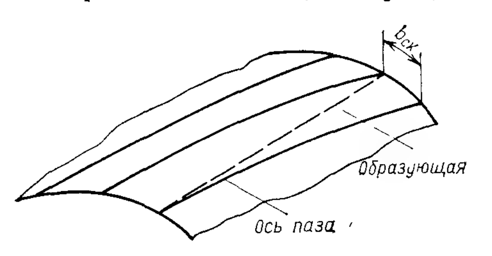


Рис. 5.5. Скос пазов ротора

Опыт проектирования и эксплуатации асинхронных двигателей позволил установить наиболее благоприятные соотношения Z_1 и Z_2 [2]. Для асинхронных двигателей общего назначения с короткозамкнутым и фазным роторами соотношение чисел пазов Z_1/Z_2 можно принять по табл. 5.8, составленной по данным асинхронных двигателей 4А.

В целях улучшения пусковых характеристик и снижения уровня шума в асинхронных двигателях с высотой оси вращения до 160 мм включительно пазы ротора скашивают, как правило, на одно зубцовое деление статора. Скос $b_{ск}$ означает максимальный сдвиг оси паза относительно образующей цилиндрической поверхности ротора, проведенной из одного конца паза в другой (рис. 5.5). Однако скос пазов увеличивает трудоемкость изготовления двигателя. Поэтому в двигателях с высотой оси вращения более 160 мм скоса пазов не делают. Это целесообразно еще и потому, что, как показывает опыт, скос пазов в этих двигателях не дает значительного эффекта в улучшении пусковых характеристик.

Таблица 5.8

Высота оси вращения, мм	Z_1/Z_2 при $2p$					
	2	4	6	8	10	12
Двигатели с короткозамкнутым ротором						
50	12/9	12/15	—	—	—	—
56	24/18	24/18	—	—	—	—
63	24/18	24/18	36/28	—	—	—
71	24/20	24/18	36/28	36/28	—	—
80—100	24/20	36/28	36/28	36/28	—	—
112	24/22	36/34	54/51	48/44	—	—
132	24/19	36/34	54/51	48/44	—	—
160	36/28	48/38	54/50	48/44	—	—
180, 200	36/28	48/38	72/58	72/58	—	—
225	36/28	48/38	72/56	72/56	—	—
250	48/40	60/50	72/56	72/56	90/76	—
280—355	48/38	60/50	72/82	72/86	90/106	90/106
Двигатели с фазным ротором						
160	—	48/36	54/36	48/36	—	—
180, 200	—	48/36	72/54	72/48	—	—
225	—	48/66	72/81	72/84	—	—
250—355	—	60/72	72/81	72/84	90/120	90/108

Пазы статора. Практическое применение в машинах переменного тока получили следующие формы пазов сердечника статора:

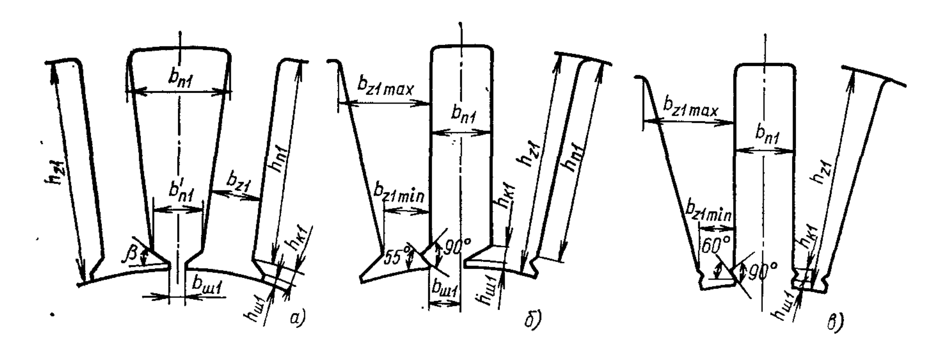


Рис. 5.6. Пазы статора машин переменного тока:

а — полузакрытый трапецеидальный; *б* — полуоткрытый прямоугольный; *в* — открытый прямоугольный

трапецеидальные полузакрытые и прямоугольные полуоткрытые или открытые (рис. 5.6).

При *трапецеидальных* пазах зубцы статора имеют параллельные стенки и их сечение по высоте паза одинаково. Отсутствие в таких зубцах участков уменьшенного сечения способствует снижению магнитного напряжения зубцов и лучшему использованию активной зоны сердечника. Другим достоинством трапецеидальных пазов является их малое раскрытие, что способствует уменьшению пульсации магнитной индукции в зазоре двигателя, уменьшению магнитного напряжения воздушного зазора (см. § 5.7) и уменьшению добавочных потерь. Однако при таких пазах коэффициент заполнения паза медью невелик. Область применения полузакрытых пазов определяется областью применения всыпной обмотки статора, выполняемой из проводов круглого сечения.

При пазах *прямоугольной* формы зубцы статора имеют трапецеидальную форму с уменьшенным сечением со стороны воздушного зазора. Магнитная индукция в этом сечении зубцов имеет максимальное значение, что ведет к возрастанию магнитного напряжения зубцов. Большое раскрытие полуоткрытых, а тем более открытых пазов вызывает усиление пульсаций магнитной индукции в зазоре и способствует увеличению магнитного напряжения воздушного зазора и увеличению добавочных потерь. Но при таких пазах выше коэффициент заполнения паза медью, так как проводники прямоугольного сечения расположены в пазу упорядоченно.

Таблица 5.9

h, мм	$2p$	Форма пазов статора	Тип обмотки статора	Рекомендуемые значения магнитной индукции, Тл, при исполнении двигателей по способу защиты IP44	
				B_{z1max}	B_{c1}
50—132	2, 4	Трапецеидальные	Однослойная всыпная	1,75—1,95	1,50—1,65
	6			1,75—1,95	1,45—1,60
	8			1,70—1,90	1,20—1,35
160	2	То же	Двухслойная всыпная	1,75—2,0	1,45—1,70
	4		Однослойная всыпная	1,75—2,0	1,45—1,70
	6		То же	1,70—1,85	1,35—1,50
	8		»	1,70—1,85	1,10—1,20
180—250	2,	То же	Двухслойная всыпная	1,70—1,90	1,45—1,65
	4, 6		Одно-двухслойная всыпная	1,70—1,90	1,45—1,65
	8		Двухслойная всыпная	1,70—1,85	1,10—1,20
280—355	2, 4, 6, 8	Прямоугольные полуоткрытые	Двухслойная из жестких полукатушек	1,70—1,90	1,40—1,60
	10	Трапецеидальные полузакрытые	Двухслойная концентрическая всыпная	1,60—1,80	1,30—1,45
	12	То же	То же	1,60—1,80	1,15—1,30

Примечание. Для двигателей исполнения по способу защиты IP23 рекомендуемые значения магнитной индукции следует увеличить на 8 %.

В табл. 5.9 приведены рекомендации по выбору формы паза статора и типа обмотки для машин общего назначения при напряжении $U_1 \leqslant 1000$ В. Эта таблица составлена по данным двигателей серии 4А основного исполнения. В двигателях узкоспециализированных исполнений в целях повышения их надежности целесообразно применение открытых пазов.

При определении размеров паза различают его размеры в свету и в штампе. Размеры в свету несколько меньше размеров в штампе из-за неточности штамповки и некоторого уменьшения паза при сборке листов в сердечник, что учитывается припусками на штамповку по высоте $h_{пр}$ и ширине $b_{пр}$ паза. Значения этих величин можно принять в зависимости от высоты оси вращения двигателей следующими:

Высота оси вращения, мм	Припуск на штамповку по высоте и ширине паза, мм
50—132	0,1
160—250	0,2
280—355	0,3

Трапецеидальные полузакрытые пазы (рис. 5.6, *а*). Размеры трапецеидального паза выбирают такими, чтобы зубец имел параллельные стенки. Ширина зубца, мм, определяется по допустимому значению магнитной индукции в зубце статора B_{z1max} (см. табл. 5.9):

$$b_{z1} = t_1 B'_\delta / k_{c1} B_{z1max}, \tag{5.9}$$

где t_1 — зубцовое деление статора, т. е. расстояние между осями двух соседних зубцов, измеренное по внутреннему диаметру статора, мм:

$$t_1 = \pi D_1 / Z_1. \tag{5.10}$$

Высота зубца, мм,

$$h_{z1} = 0{,}5\,(D_{1н} - D_1) - h_{c1}, \tag{5.11}$$

где h_{c1} — высота спинки статора, мм.

Значение h_{c1} определяется допустимыми величинами магнитной индукции в спинке статора B_{c1} (табл. 5.9):

$$h_{c1} = 0{,}5\alpha'_i \tau B'_\delta / k_{c1} B_{c1}, \tag{5.12}$$

где $\tau = \pi D_1/2p$.

Наименьшая ширина трапецеидального полузакрытого паза в штампе, мм,

$$b'_{п1} = t''_1 - b_{z1}, \tag{5.13}$$

где

$$t''_1 = \pi\,(D_1 + 0{,}2h_{z1})/Z_1. \tag{5.14}$$

Наибольшая ширина паза в штампе, мм,

$$b_{п1} = t'_1 - b_{z1}, \tag{5.15}$$

где

$$t'_1 = \pi\,(D_1 + 2h_{z1})/Z_1. \tag{5.16}$$

Ширина шлица паза статора $b_{ш1}$ должна быть такова, чтобы при принятой толщине пазовой изоляции через шлицы можно было уложить в пазы катушки (секции) по одному проводу. Обычно диаметр изолированного провода не превышает $d_{из} = 1{,}76$ мм, а $b_{ш1} \leqslant 4{,}0$ мм.

Высота шлица $h_{ш1} \approx 0{,}8 \div 1{,}2$ мм. Угол $\beta = 45°$ в двигателях с высотой оси вращения $h \leqslant 250$ мм и $\beta = 30°$ в двигателях с $h \geqslant 280$ мм. Тогда высота клиновой части паза $h_{к1}$, мм:

при $\beta = 45°$

$$h_{к1} = 0{,}5\,(b'_{п1} - b_{ш1}); \tag{5.17}$$

при β=30°

$$h_{к1} = 0{,}29\,(b'_{п1} - b_{ш1}). \quad (5.18)$$

Площадь поперечного сечения трапецеидального паза в штампе, мм²,

$$S_{п1} = 0{,}5\,(b_{п1} + b'_{п1})\,h_{п1} + 0{,}5\,(b'_{п1} + b_{ш1})\,h_{к1} + b_{ш1}\,h_{ш1}, \quad (5.19)$$

где $h_{п1} = h_{z1} - h_{к1} - h_{ш1}$.

Прямоугольные полуоткрытые пазы (рис. 5.6, б). Ширина зубца в узком месте, мм,

$$b_{z1min} = t_1\,B'_\delta/k_{c1}\,B_{z1max}. \quad (5.20)$$

Максимальное значение магнитной индукции в зубце статора может быть предварительно принято по табл. 5.9.

Ширина полуоткрытого паза в штампе, мм,

$$b_{п1} = t''_1 - b_{z1min}, \quad (5.21)$$

где

$$t''_1 = \pi\,(D_1 + 2h_{ш1} + 2h_{к1})/Z_1. \quad (5.22)$$

Для полуоткрытых пазов отношение $b_{п1}/t'_1 \approx 0{,}46 \div 0{,}56$, причем бóльшие значения относятся к меньшим диаметрам D_1.

Высота шлица $h_{ш1} = 0{,}8 \div 1{,}2$ мм; высоту клиновой части паза принимают при $2p = 2$ $h_{к1} = 3{,}5$ мм, при $2p = 4$, 6 и 8 $h_{к1} = 3{,}0$ мм.

Ширину шлица полуоткрытого паза, мм, принимают

$$b_{ш1} \approx (0{,}58 \div 0{,}60)\,b_{п1}.$$

Высота паза (зубца) определяется по (5.11).

Высота части паза, занимаемой обмоткой, мм

$$h_{п1} = h_{z1} - h_{ш1} - h_{к1}. \quad (5.23)$$

Прямоугольные открытые пазы (рис. 5.6, в). Размеры открытых пазов определяют аналогично размерам полуоткрытых пазов.

Пазы ротора. Выбор формы пазов короткозамкнутого ротора (рис. 5.7) зависит от мощности двигателя, числа полюсов $2p$ и требуемых пусковых характеристик.

В двигателях небольшой мощности обычно применяют пазы овальной формы (рис. 5.7, *а* и *б*). С ростом мощности для двухполюсных двигателей используют пазы бутылочной формы или овальные пазы с уменьшенным сечением в верхней части (рис. 5.7, *в*, *г*), в которых явление вытеснения тока в стержнях ротора проявляется более эффективно. Это способствует улучшению пусковых свойств короткозамкнутых двигателей (уменьшению начального пускового тока и увеличению начального пускового момента). Для двигателей с $2p \geq 4$ применяют пазы по рис. 5.7, *а*, *б*.

Таблица 5.10, составленная по данным асинхронных двигателей серии 4А основного исполнения, содержит рекомендации по выбору формы пазов короткозамкнутого ротора.

Ширина зубца ротора b_{z2}, мм, определяется значением магнитной индукции в расчетном сечении зубца B_{z2max} (табл. 5.10):

$$b_{z2} = t_2\,B'_\delta/k_{c2}\,B_{z2max}, \quad (5.24)$$

где t_2 — зубцовое деление по наружному диаметру ротора D_2, мм:

$$t_2 = \pi D_2/Z_2; \quad (5.25)$$

k_{c2} — коэффициент заполнения сердечника ротора сталью.

Высота зубца (паза) ротора, мм,

$$h_{z2} = 0{,}5\,(D_2 - D_{2вн}) - h_{c2}. \quad (5.26)$$

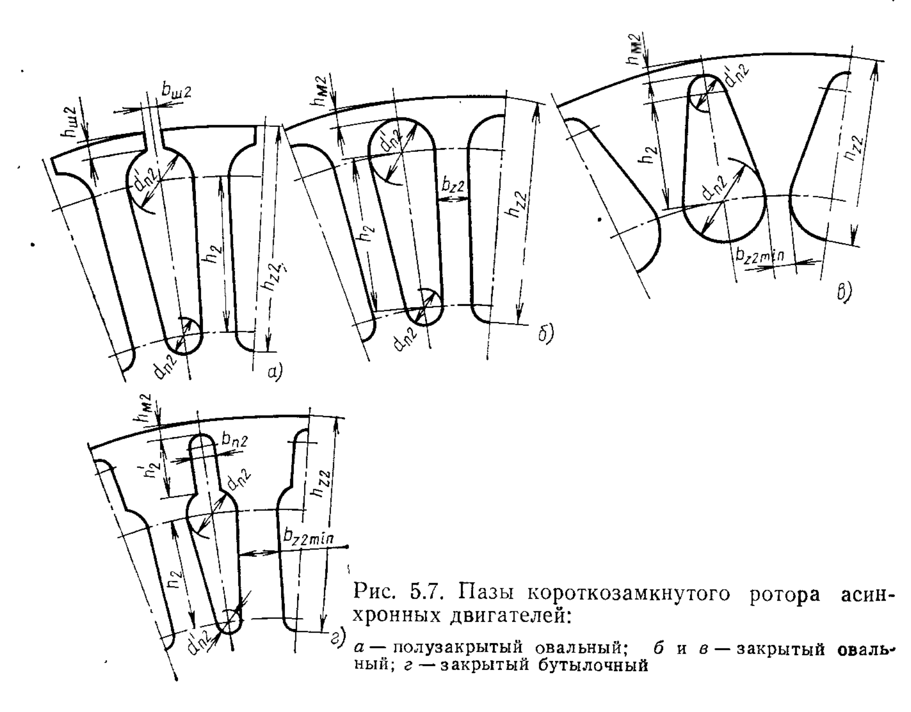


Рис. 5.7. Пазы короткозамкнутого ротора асинхронных двигателей:

а — полузакрытый овальный; *б* и *в* — закрытый овальный; *г* — закрытый бутылочный

Высота спинки сердечника ротора h_{c2}, мм, определяется допустимым значением магнитной индукции в спинке ротора B_{c2} (см. табл. 5.10):

$$h_{c2} = 0{,}5\alpha'_i\,\tau B'_\delta/k_{c2}\,B_{c2}. \quad (5.27)$$

В некоторых случаях при проектировании двигателей небольшой мощности высоту спинки ротора h_{c2} принимают исходя из соображения механической прочности сердечника. При этом значение магнитной индукции B_{c2} оказывается намного ниже рекомендуемых в табл. 5.10.

Размеры овальных пазов, выполненных по рис. 5.7, *а* и *б*, рассчитывают таким образом, чтобы зубцы ротора имели параллель-

Таблица 5.10

h, мм	$2p$	Форма пазов ротора по рис. 5.7	Рекомендуемые значения магнитной индукции, Тл, при исполнении двигателя по способу защиты IP44	
			B_{z2max}	B_{c2}
50—132	2 4 6 8	а а а а	1,75—1,95 1,75—1,95 1,75—1,95 1,70—1,90	1,35—1,45 1,15—1,25 1,05—1,15 0,75—0,85
160—225	2 4 6 8	а б б б	1,75—1,95 1,55—1,80 1,65—1,90 1,65—1,90	1,35—1,45 1,20—1,35 1,05—1,15 0,75—0,85
250	2 4 6 8	г а а а	1,70—1,95 1,65—1,90 1,65—1,90 1,65—1,90	1,35—1,45 1,15—1,25 1,05—1,15 0,75—0,85
280—355	2 4 6 8 10, 12	г б б б б	1,60—1,85 1,80—2,00 1,65—1,90 1,65—1,90 1,65—1,90	1,35—1,45 1,15—1,25 1,05—1,15 0,75—0,85 0,75—0,85

Примечание. Для двигателей исполнения IP23 рекомендуемые значения магнитной индукции следует увеличить на 8 %.

ные стенки. Для этого диаметры пазов определяют по формулам: диаметр в верхней части паза, мм,

$$d'_{п2} = [\pi (D_{2н} - 2h_{ш2}) - Z_2 b_{z2}]/(Z_2 + \pi); \quad (5.28)$$

диаметр в нижней части паза, мм

$$d_{п2} = [\pi (D_{2н} - 2h_{z2}) - Z_2 b_{z2}]/(Z_2 - \pi). \quad (5.29)$$

Диаметр в нижней части паза $d_{п2}$ должен быть не менее 2 мм у двигателей с $h \leqslant 132$ мм и не менее 3,5 мм у двигателей с $h \geqslant \geqslant 160$ мм. Расстояние между центрами окружностей овального паза, мм,

$$h_2 = h_{z2} - h_{ш2} - 0,5 (d_{п2} + d'_{п2}). \quad (5.30)$$

В случае овального закрытого паза в (5.28) и (5.30) вместо высоты шлица $h_{ш2}$ следует подставить высоту мостика $h_{м2} = 0,5 \div 1,0$ мм. Для овальных полузакрытых пазов (рис. 5.7, *а*) $h_{ш2} = 0,50 \div 0,70$ мм, $b_{ш2} = 1,0 \div 1,5$ мм.

При овальном закрытом пазе, выполненном по рис. 5.7, *в*, больший диаметр $d_{п2}$ определяется по (5.29), но вместо b_{z2} нужно подставить ширину зубца в расчетном сечении b_{z2min} по (5.24).

Меньший диаметр этого паза принимают равным, мм,

$$d'_{п2} \approx (0,60 \div 0,80) d_{п2}. \quad (5.31)$$

Площадь поперечного сечения овального паза в штампе, мм²,

$$S_{п2} = 0,25\pi (d^2_{п2} + d'^2_{п2}) + 0,5h_2 (d_{п2} + d'_{п2}). \quad (5.32)$$

Для бутылочного паза (рис. 5.7, *г*) размеры нижней части выбирают из условия получения зубца с параллельными стенками. Ширину b_{z2min} определяют по (5.24) с учетом принятой по табл. 5.10 магнитной индукции B_{z2max}. Больший диаметр нижней части паза, мм,

$$d_{п2} = [\pi (D_2 - 2h_{м2} - 2h'_2) - Z_2 b_{z2min}]/(Z_2 + \pi), \quad (5.33)$$

где $h_{м2} = (0,2 \div 0,5)$ мм; $h'_2 = 15$ мм.

Высоту зубца h_{z2} определяют по (5.26) с учетом принятой магнитной индукции в спинке сердечника ротора B_{c2}.

Меньший диаметр нижней части паза, мм,

$$d'_{п2} = [\pi (D_2 - 2h_{z2}) - Z_2 b_{z2min}]/(Z_2 - \pi). \quad (5.34)$$

Значение $d'_{п2}$ должно быть не менее 4 мм.

Расстояние между центрами диаметров нижней части бутылочного паза, мм,

$$h_2 = h_{z2} - h_{м2} - h'_2 - 0,5 (d_{п2} + d'_{п2}). \quad (5.35)$$

Площадь поперечного сечения нижней части паза в штампе, мм²,

$$S_{п2,н} = 0,125\pi (d^2_{п2} + d'^2_{п2}) + 0,5h_2 (d_{п2} + d'_{п2}). \quad (5.36)$$

Ширину верхней части паза принимают равной

$$b_{п2} = (0,5 \div 0,6) d_{п2}. \quad (5.37)$$

Площадь поперечного сечения верхней части паза в штампе, мм²,

$$S_{п2в} = 0,5d_{п2} (h'_2 - 0,25d_{п2}). \quad (5.38)$$

Площадь бутылочного паза, мм²,

$$S_{п2} = S_{п2н} + S_{п2в}. \quad (5.39)$$

5.4. ОБМОТКА СТАТОРА

Элементом обмотки статора является катушка (секция). Каждый виток этой катушки состоит из двух пазовых частей, располагаемых в пазах сердечника статора, и лобовых частей. Расстояние между пазовыми частями одной катушки, измеренное в пазах, называют шагом обмотки. Шаг обмотки y_1 может быть полным (диаметральным), если он равен полюсному делению ($y_1 = \tau = Z_1/2p$), или укороченным, если он меньше полюсного деления ($y_1 < \tau$). Укорочение шага обмотки способствует улучшению формы кривой

распределения магнитной индукции в воздушном зазоре машины, приближая ее к синусоиде. Это позволяет снизить добавочные потери и уменьшить провалы в механической характеристике асинхронного двигателя.

Катушки одной фазы обмотки, расположенные в соседних пазах и соединенные последовательно, образуют *катушечную группу*. Катушечные группы, входящие в обмотку фазы, могут быть соединены между собой последовательно, параллельно или последовательно-параллельно. Три фазные обмотки, соединенные в звезду или треугольник, образуют трехфазную обмотку статора.

Катушечные группы обмотки, соединенные между собой, образуют *параллельные ветви*. Число параллельных ветвей в обмотке одной фазы зависит от способа соединения катушечных групп: при последовательном соединении их число минимально ($a_1=1$), при параллельном соединении их число равно числу полюсов $2p$, при смешанном соединении (последовательно-параллельном) можно получить $1<a_1<2p$.

Если пазовые стороны катушек расположены в пазах сердечника в один слой (пазовая сторона катушки занимает весь паз), то обмотку называют однослойной. Если же пазовые стороны катушек расположены в пазах в два слоя (пазовая сторона катушки занимает половину паза), то обмотку называют двухслойной.

Однослойные обмотки статора не допускают укорочения шага y_1, поэтому двигатели с такими обмотками имеют ухудшенные рабочие и пусковые показатели. Кроме того, они имеют большой вылет лобовых частей и повышенный расход обмоточной меди (рис. 5.8, *а*). Однако эти обмотки наиболее пригодны для механизированной укладки, что способствует снижению трудоемкости изготовления двигателей. По этой причине однослойные обмотки статора получили применение в асинхронных двигателях с высотами оси вращения $h\leqslant160$ мм, имеющих наибольший объем производства.

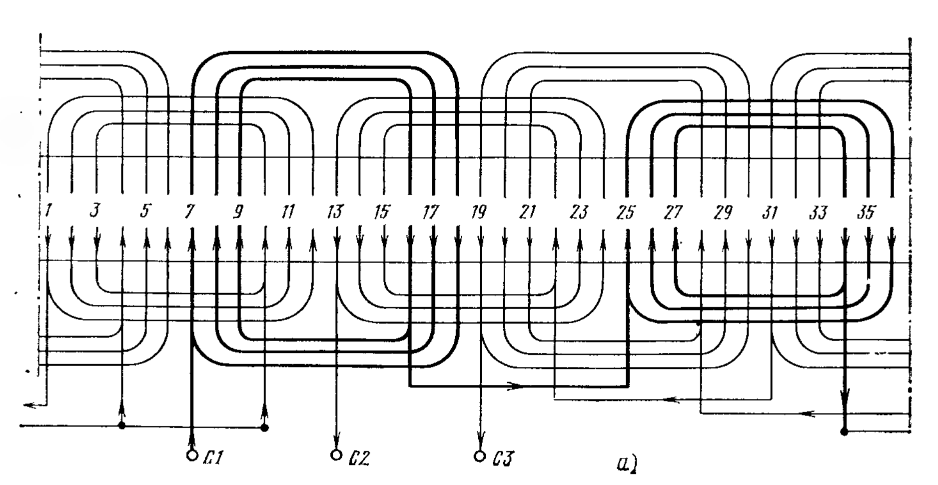
В асинхронных двигателях с высотами оси вращения $h\geqslant180$ мм применяют двухслойные обмотки с укороченным шагом $y_1<\tau$ (рис. 5.8, *б*).

Обмотки статора разделяются на всыпные (с мягкими катушками) и обмотки с жесткими катушками (полукатушками). Всыпная обмотка изготавливается из обмоточного провода круглого сечения. Провод наматывают на шаблон для придания катушке предварительной формы. Затем катушки укладывают в заранее изолированные пазы трапецеидальной формы. После укладки катушек и закрепления их в пазах посредством клиньев или крышек производят формовку лобовых частей и их бандажирование. Затем обмотанный статор пропитывают.

Обмотки из жестких катушек или полукатушек выполняют обмоточным проводом прямоугольного сечения. При этом еще до укладки катушек (полукатушек) в пазы сердечника статора им придают требуемую форму и наносят изоляцию. Затем их укладывают в полуоткрытые или открытые пазы (рис. 5.9, *б*, *в*).

При решении вопроса о выборе типа обмотки статора для асинхронных двигателей общего назначения можно воспользоваться рекомендациями табл. 5.9.

Сравнение рассмотренных двух видов обмоток статора позволяет сделать следующие выводы: всыпные обмотки с мягкими катушками являются наиболее технологичными, так как намотка катушечных групп, а иногда и фазной обмотки целиком, может вы-



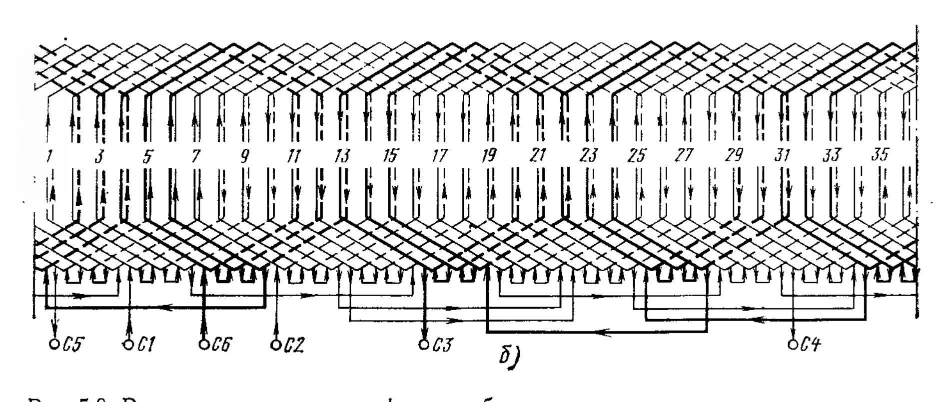


Рис. 5.8. Развернутые схемы трехфазных обмоток статора:

а — однослойная концентрическая обмотка ($Z_1=36$, $2p=4$, $q_1=3$); *б* — двухслойная обмотка ($Z_1=36$, $2p=4$, $q_1=3$)

полняться без разрыва провода, что дает возможность получить обмотку с минимальным количеством паек; трапецеидальные полузакрытые пазы, в которые укладывают всыпную обмотку, обеспечивают наиболее благоприятное использование зубцовой зоны статора, а небольшое раскрытие пазов позволяет значительно ослабить пульсации магнитного потока в воздушном зазоре. Достоинствами жестких обмоток являются лучшее заполнение пазов

медью за счет прямоугольного сечения обмоточных проводов и более высокая надежность, обусловленная тем, что в пазы статора укладывают уже готовые катушки, не подвергаемые механическим деформациям, как это происходит при укладке всыпной обмотки.

В силу перечисленных преимуществ всыпные обмотки получили наибольшее применение в асинхронных двигателях напряжением до 1000 В, мощностью до 100 кВт ($h \leqslant 250$ мм). Другой причиной, способствующей преобладающему применению всыпных обмоток в асинхронных двигателях, является возможность механизации процесса намотки, изолировки и укладки обмотки в пазы сердечника статора. Механизация этих процессов имеет большое народнохозяйственное значение и является одним из важнейших средств повышения производительности труда на электромашиностроительных заводах.

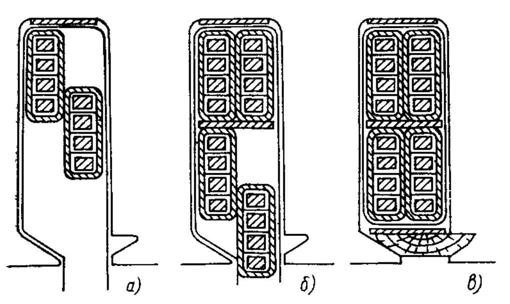


Рис. 5.9. Порядок укладки пазовых сторон жестких полукатушек в полуоткрытые пазы статора

Однако механизация про-

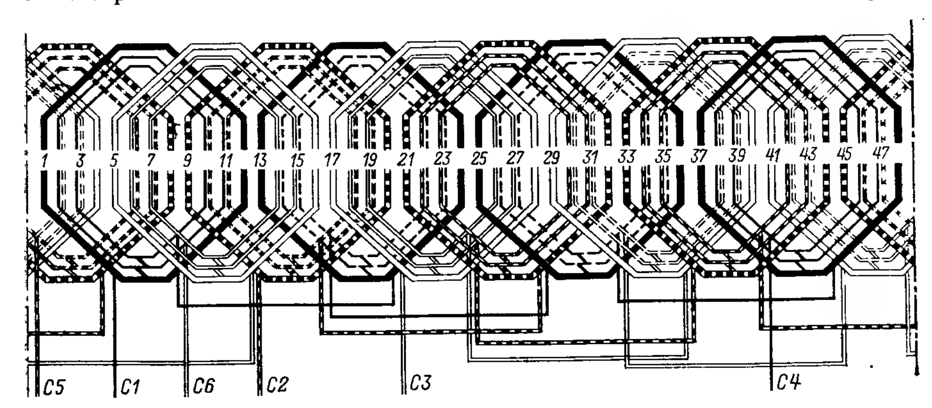


Рис. 5.10. Развернутая схема одно-двухслойной обмотки статора ($Z_1=48$, $2p=4$, $q_1=4$)

цесса укладки двухслойных обмоток статора затруднена тем, что укладка пазовых сторон нижнего слоя некоторых катушек возможна лишь при временном подъеме ранее уложенных пазовых сторон.

В целях расширения области применения механизированной укладки обмоток статора в последнее время были разработаны новые схемы обмоток, например, *одно-двухслойная концентрическая обмотка* статора (рис. 5.10). Каждая катушечная группа такой обмотки состоит из одной большой катушки, имеющей удвоенное число витков с пазовыми сторонами, занимающими весь паз (пазы *1* и *12*, *5* и *16*, *13* и *24* и т. д.), — однослойная обмотка — и (q_1—2) малых концентрических катушек с одинарным числом витков, расположенных в два слоя — двухслойная обмотка. В каждой фазе содержится одинаковое число больших и малых катушек, обе стороны которых лежат либо только на дне пазов, либо только в верхних слоях пазов. Одно-двухслойная обмотка выполнима лишь с числом пазов на полюс и фазу $q_1 > 2$. При $q_1=2$ обмотка превращается в однослойную концентрическую.

Число пазов на полюс и фазу определяется выражением

$$q_1 = Z_1/2pm_1. \qquad (5.40)$$

Следует иметь в виду, что оценка технологичности обмотки статора, с точки зрения возможности механизации процессов ее изготовления, имеет значение лишь при проектировании двигателей для серийного изготовления.

Следующим важным этапом проектирования обмотки статора является выбор класса нагревостойкости и конструкции системы изоляции. При этом можно руководствоваться данными серии 4А: в двигателях с высотами оси вращения $h=50 \div 132$ мм применяют систему изоляции класса нагревостойкости В, а в двигателях с $h=160 \div 355$ мм — класса нагревостойкости F.

В табл. 5.11—5.14 приведены конструкции изоляции обмоток статора, применяемые в двигателях серии 4А.

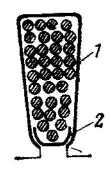


Таблица 5.11. Конструкция системы изоляции всыпной обмотки статора двигателей с $h=50 \div 132$ мм (класс нагревостойкости В)

Позиция на рисунке	Наименование	Материал: Наименование, марка	Материал: Толщина, мм	Число слоев
1	Коробка пазовая	Пленка полиэтилентерефталатная ПЭТФ	0,19* 0,25*	1 1
2	Крышка пазовая	То же	0,25* 0,35*	1 1
—	Прокладка междуфазовая в лобовых частях	Пленкоасбокартон	0,35	1
—	Изоляция внутримашинных соединений и выводных концов	Трубка изоляционная ТКСП	—	—
—	Бандаж лобовых частей	Нить полиэфирная	—	—
—	Пропитка	Лак МЛ-92 или компаунд КП-34	—	—
—	Покрытие лобовых частей	Эмаль ГФ-92-ГС	—	—

* Для двигателей с $h=50 \div 63$ мм.
** Для двигателей с $h=71 \div 132$ мм.

Важным параметром обмотки статора является число пазов на полюс и фазу q_1 [см. (5.40)]. Обычно выбирают q_1 равным целому числу. Но в целях применения одного и того же штампа для листов статора двигателей с разным числом полюсов возможно применение дробного q_1, например 1,5; 2,5; и т. д. Для числа пазов статора Z_1 в соответствии с данными табл. 5.8 значения q_1 в зависимости от высоты оси вращения h приведены в табл. 5.15.

Пазовые стороны одной катушечной группы, расположенные в соседних пазах, занимают q_1 пазов и образуют фазную зону, определяемую углом

$$\alpha = 2\pi p q_1 / Z_1. \qquad (5.41)$$

Наибольшее применение в трехфазных асинхронных двигателях получили шестизонные обмотки с $\alpha = 60°$. Если число пазов на полюс и фазу q_1 равно целому числу, то все фазные зоны равны 60°, если же q_1 равно дробному числу, то часть фазных зон такой

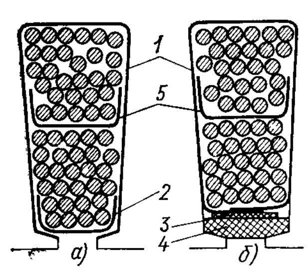


Таблица 5.12. Конструкция системы изоляции и элементы крепления всыпной обмотки статора двигателей с $h = 160 \div 250$ мм при механизированной (*а*) и ручной (*б*) укладках обмотки

Позиция на рисунке	Наименование	Наименование		Число слоев
		Наименование и марка	Толщина, мм	
1	Коробка пазовая	Пленкосинтокартон ПСКФ или изоном	0,37—0,4	1
2	Крышка пазовая	То же	0,5	1
3	Прокладка	Стеклотекстолит СТЭФ-1	0,5	1
4	Клин пазовый	Профильный стеклопластик СПП-Э или стеклотекстолит СТЭФ-1	—	—
5	Прокладка междуслойная	Пленкосинтокартон ПСКФ или изоном	0,5	1
—	Прокладка междуфазовая в лобовых частях	Пленкосинтокартон ПСКФ или изоном	0,37—0,4	1
—	Изоляция внутримашинных соединений и выводных концов	Трубка изоляционная ТКСП	—	—
—	Бандаж лобовых частей	Шнур-чулок АСЭЧ	—	—
—	Пропитка	Лак ПЭ-993	—	—
—	Покрытие лобовых частей	Эмаль ЭП-91	—	—

Примечание. При $h=160$ мм и $2p \geq 4$ обмотка статора однослойная (см. рис. табл. 5.11).

обмотки $\alpha < 60°$, а часть — $\alpha > 60°$. В среднем же фазная зона этой обмотки $\alpha_{ср} = 60°$. Возможны трехфазные обмотки с фазной зоной $\alpha = 120°$, но такие обмотки имеют ограниченное применение.

Одним из важных параметров обмотки статора является *обмоточный коэффициент*. Для основной гармоники ЭДС обмотки статора обмоточный коэффициент равен

$$k_{об1} = k_{у1} k_{р1}, \qquad (5.42)$$

где $k_{у1}$ — коэффициент укорочения, учитывающий уменьшение ЭДС, обусловленное укорочением шага обмотки:

$$k_{у1} = \sin(\beta \cdot 90°); \qquad (5.43)$$

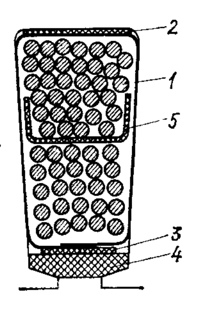


Таблица 5.13. Конструкция системы изоляции и элементы крепления всыпной обмотки статора двигателей с $h = 280 \div 355$ мм (класс нагревостойкости F)

Позиция на рисунке	Наименование	Материал		Число слоев
		Наименование, марка	Толщина, мм	
1	Коробка пазовая	Стеклолакоткань ЛСП-130/155	0,15	1
		Электронит	0,3	1
2	Прокладка	Стеклотекстолит СТЭФ-1	0,5	1
3	Прокладка	То же	0,5	1
4	Клин пазовый	»	—	—
5	Прокладка междуслойная	Стеклослюдопласт ГИТ-Т-ЛСБ	0,45	1
—	Прокладка междуфазовая в лобовых частях	То же	0,45	1
—	Бандаж лобовых частей	Лента стеклянная ЛЭС или лента лавсановая тафтяная	0,2 0,16	1 (вразбежку)
—	Привязка междуслойной прокладки на выходе из паза	Шнур-чулок АСЭЧ	—	—
—	Изоляция внутримашинных соединений	Стеклолакоткань ЛСТР	0,18	2 (вполнахлеста)
		Трубка изоляционная ТКР	—	—
—	Изоляция выводных концов	Стеклолакоткань ЛСТР	0,18	2 (вполнахлеста)
—	Пропитка	Лак КО-964н	—	—
—	Покрытие лобовых частей	Эмаль ЭП-91	—	—

здесь β — относительный шаг обмотки:

$$\beta = y_1/\tau, \tag{5.44}$$

при $2p=2$ $\beta=0{,}58\div0{,}63$; при $2p=4$ $\beta=0{,}80\div0{,}89$; k_{p1}— коэффициент распределения, учитывающий уменьшение ЭДС основной гармоники, обусловленное распределением обмотки в пазах ($q_1>>1$):

$$k_{p1} = \frac{\sin(\alpha/2)}{q_1 \sin(\alpha/2q_1)}. \tag{5.45}$$

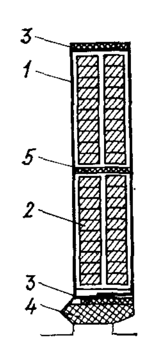


Таблица 5.14. **Конструкция системы изоляции и элементы крепления жесткой обмотки статора двигателей с $h=280\div355$ (класс нагревостойкости F)**

Позиция на рисунке	Наименование	Материал: Наименование, марка	Материал: Толщина, мм	Число слоев
1	Коробка пазовая	Стеклослюдопласт ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	0,55	1
2	Скрепление пазовой части полукатушки	Лента стеклянная ЛЭС или лента лавсановая тафтяная	0,2 0,16	1 (вразбежку)
3	Прокладка	Стеклотекстолит СТЭФ-1	0,5	1
4	Клин пазовый	То же	—	—
5	Прокладка междуслойная	»	1,0	1
—	Скрепление лобовой части полукатушки	Лента стеклянная ЛЭС или лента лавсановая тафтяная	0,2 0,16	1 (вполнахлеста)
—	Изоляция лобовых частей фазных катушек	Лента слюдинитовая ЛСЭП-934-ТПл	0,13	1 (вполнахлеста)
—	Прокладка дистанционная в лобовых частях	Стеклотекстолит СТЭФ-1	12	—
—	Изоляция внутримашинных соединений	Стеклолакоткань ЛСТР	0,18	2 (вполнахлеста)
—	Изоляция выводных концов	Трубка изоляционная ТКР	—	—
—	Бандаж лобовых частей	Шнур-чулок АСЭЧ	—	—
—	Пропитка	Лак КО-964н	—	—
—	Покрытие лобовых частей	Эмаль ЭП-91	—	—

Таблица 5.15

h, мм	Значения q_1 при $2p$: 2	4	6	8	10	12
50—63	4	2	2	—	—	—
71	4	2	2	1,5	—	—
80—100	4	3	2	1,5	—	—
112—132	4	3	3	2	—	—
160	6	4	3	2	—	—
180—225	6	4	4	3	—	—
250	8	5	4	3	—	—
280—355	8	5	4	3	3	2,5

Анализ выражения (5.45) показывает, что трехфазные обмотки шестизонные ($\alpha=60°$) при одинаковом значении q_1 имеют большее значение k_{p1}, а следовательно, и более высокий обмоточный коэффициент $k_{об1}$, чем трехзонные обмотки ($\alpha=120°$).

В табл. 5.16 приведены значения коэффициентов k_{p1}, k_{y1} и $k_{об1}$ для трехфазных обмоток статора двигателей серии 4А основного исполнения.

Число эффективных проводников в пазу статора

$$u_п = 10^{-3} A_1 t_1 a_1 / I_{1ном}, \tag{5.46}$$

где $I_{1ном}$ — номинальный ток статора, А:

$$I_{1ном} = \frac{P_{ном}\cdot 10^3}{m_1 U_{1ном} \eta'_{ном} \cos\varphi'_{1ном}}. \tag{5.47}$$

Полученное по (5.46) значение $u_п$ округляют до целого числа. Число последовательных витков в обмотке фазы статора

$$w_1 = p q_1 u_п / a_1. \tag{5.48}$$

Площадь поперечного сечения эффективного проводника обмотки статора, мм²,

$$q_{1эф} = I_{1ном}/a_1\Delta_1. \tag{5.49}$$

Таблица 5.16

q_1	k_{p1}	$Z_1/2p$	$2p=2$: y_1	$2p=2$: β	$2p=2$: k_{y1}	$2p=2$: $k_{об1}$	$2p\geq4$: y_1	$2p\geq4$: β	$2p\geq4$: k_{y1}	$2p\geq4$: $k_{об1}$
1,5	0,960	4,5	—	—	—	—	4	0,889	0,985	0,945
2	0,966	6	—	—	—	—	5	0,833	0,966	0,935
2,5	0,957	7,5	—	—	—	—	6	0,800	0,951	0,910
3	0,960	9	—	—	—	—	7	0,778	0,940	0,902
4	0,958	12	—	—	—	—	10	0,833	0,966	0,925
5	0,957	15	—	—	—	—	12	0,800	0,951	0,910
6	0,956	18	11	0,611	0,819	0,783	15	0,833	0,966	0,923
8	0,956	24	15	0,625	0,832	0,795	19	0,792	0,947	0,905

Здесь Δ_1 — плотность тока в обмотке статора, А/мм². При выборе Δ_1 следует помнить, что с увеличением Δ_1 уменьшается расход обмоточной меди, но одновременно растет активное сопротивление обмотки статора, что ведет к росту электрических потерь, температуры обмотки, снижению КПД.

С уменьшением Δ_1 растет КПД двигателя и повышается надежность обмотки статора за счет снижения ее температуры. При выборе плотности тока в обмотке статора можно руководствоваться рис. 5.11. Для двигателей исполнения IP23 и способом охлаждения IC01 значение Δ_1 по

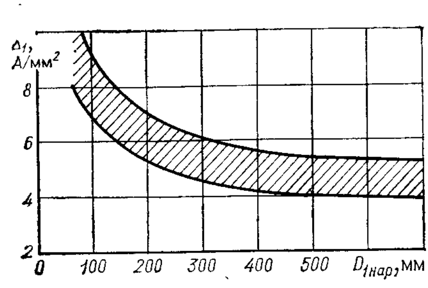


Рис. 5.11. Рекомендуемые значения плотности тока в обмотке статора Δ_1' трехфазных асинхронных двигателей исполнения IP44 и способом охлаждения IC0141

рис. 5.11 следует увеличить на 25 % при $2p=2$ и на 20 % при $2p>2$. При отличии принятого класса нагревостойкости системы изоляции от рекомендуемого значения Δ_1 следует умножить на коэффициент $k_{\Delta 1}$ (табл. 5.17).

При расчете всыпной обмотки статора следует иметь в виду, что диаметр обмоточного изолированного провода не должен превышать $d_{из} \leqslant 1{,}76$ мм при ручной укладке и $d_{из} \leqslant 1{,}4$ мм при машинной укладке катушек в пазы статора. Если же по результатам расчета диаметр эффективного проводника оказался больше указанных значений, то для облегчения процесса укладки мягких катушек в пазы статора и повышения надежности обмотки статора эффективный проводник выполняют из нескольких элементарных проводников. Суммарная площадь поперечного сечения элементарных проводников должна быть не меньше расчетного сечения эффективного проводника. Площадь поперечного сечения элементарного проводника, мм²,

$$q_{1эл} = q_{1эф}/n_{эл}, \tag{5.50}$$

где $n_{эл}$ — количество элементарных проводов в одном эффективном.

При расчете обмотки статора с жесткими катушками (полукатушками) площадь поперечного сечения прямоугольного провода

Таблица 5.17

h, мм	Рекомендуемый класс нагревостойкости системы изоляции	Значения $k_{\Delta 1}$ при системе изоляции класса нагревостойкости		
		B	F	H
50—132 160—355	B F	1,0 0,75	1,33 1,0	1,75 1,30

не должна превышать 18 мм². Если же по расчету требуется эффективный проводник большего сечения, то его следует составить из нескольких элементарных проводов. При полуоткрытых пазах эффективный проводник должен иметь не менее двух элементарных. Одновременно с выбором стандартного сечения прямоугольного провода выбирают и его размеры a и b (см. табл. П.1.2). При этом учитывают размеры паза и толщину витковой и пазовой изоляции. Размер элементарного провода по высоте (размер a) не должен превышать 2,5 мм (провода прямоугольного сечения для ослабления эффекта вытеснения тока укладываются в паз плашмя, как это показано на рис. 5.9).

В катушках из двух элементарных проводников, последние располагают плашмя на одной высоте так, чтобы их индуктивные сопротивления были одинаковыми. В случае $n_{эл}=4$ проводники помещают в два слоя, по два элементарных проводника в каждом слое.

На данном этапе проектирования двигателя иногда возникает необходимость в корректировании размеров паза статора, рассчитанных в § 5.2. Однако в этом случае не следует забывать, что магнитная индукция в зубцах B_{z1max} и в спинке статора B_{c1} не должна превышать допустимых значений (см. табл. 5.9).

При расчете площади трапецеидального полузакрытого паза, занимаемой обмоткой статора, необходимо руководствоваться коэффициентом заполнения паза, равным

$$k_{з1} = n_п d_{из}^2 / S_п', \tag{5.51}$$

где $n_п$ — число проводников в пазу; $d_{из}$ — диаметр изолированного проводника, мм; $S_п'$ — площадь поперечного сечения паза, мм², занимаемая непосредственно обмоткой:

$$S_п' = 0{,}5\,(b_{п1} + b_{п1}')\,h_{п1} - S_{п,из} - S_{из,пр}. \tag{5.52}$$

Значение площадей, занимаемых пазовой изоляцией $S_{п,из}$ и межкатушечной прокладкой $S_{из,пр}$, определяют, пользуясь табл. 5.12, 5.13.

Значение $k_{з1}$ должно быть равно 0,70—0,75 при ручной укладке обмотки статора и 0,70—0,72— при машинной.

Если паз статора имеет прямоугольную форму (см. рис. 5.6, *б* и *в*), то необходимо уточнить требуемые значения ширины $b_{п1}'$ и высоты $h_{п1}'$ паза в штампе:

$$b_{п1}' = 2b_{из} + b_{пр} + C_{b1}; \tag{5.53}$$

$$h_{п1}' = n_{п1}\,a_{из} + h_{пр} + C_{h1}, \tag{5.54}$$

где $a_{из}$, $b_{из}$ — размеры изолированного обмоточного провода, мм; $b_{пр}$, $h_{пр}$ — припуски на штамповку, мм; C_{b1}, C_{h1} — толщина изоляции в пазу по ширине и высоте, мм (см. табл. 5.14).

Полученные значения $b_{п1}'$ и $h_{п1}'$ должны мало отличаться от значений $b_{п1}$ и $h_{п1}$, рассчитанных по (5.21) и (5.23).

После окончательного выбора размеров обмоточного провода $q_{1эл}$ и числа элементарных проводников $n_{эл}$ необходимо уточнить плотность тока в обмотке статора, А/мм²,

$$\Delta_1 = I_{1ном}/n_{эл}\, q_{1эл}\, a_1, \qquad (5.55)$$

которая не должна превышать допустимых значений (см. рис. 5.11). Затем следует уточнить значения электромагнитных нагрузок:

$$A_1 = I_{1ном}\, u_п\, Z_1/(10^{-3}\pi D_1 a_1); \qquad (5.56)$$

$$B_\delta = \Phi/(\alpha_i\, \tau l_i \cdot 10^{-6}), \qquad (5.57)$$

где Φ — основной магнитный поток, Вб:

$$\Phi = \frac{k_E U_{1ном}}{4k_в f_1 w_1 k_{об1}}; \qquad (5.58)$$

здесь $k_{об1}$ определяется (5.42); w_1—(5.48).

Уточненные значения A_1 и B_δ должны мало отличаться от предварительных значений этих величин, принятых по рис. 5.3.

Размеры *мягких* катушек статора определяются следующим образом: среднее зубцовое деление статора, т. е. зубцовое деление, измеренное на окружности, проходящей по середине высоты зубцов статора, мм,

$$t_{1ср} = \pi(D_1 + h_{z1})/Z_1. \qquad (5.59)$$

Средняя ширина катушки, мм,

$$b_{1ср} = t_1 y_{1ср}, \qquad (5.60)$$

где $y_{1ср}$ — среднее значение шага концентрической обмотки.

Средняя длина одной лобовой части катушки, мм.

$$l_{л1} = (1{,}16 + 0{,}14p)\, b_{1ср} + 15. \qquad (5.61)$$

Средняя длина витка обмотки статора, мм,

$$l_{1ср} = 2(l_1 + l_{1л}). \qquad (5.62)$$

Длина вылета лобовой части обмотки, мм:
при $h \leqslant 132$ мм

$$l_{в1} = (0{,}19 + 0{,}1p)\, b_{1ср} + 10; \qquad (5.63)$$

при $h \geqslant 160$ мм

$$l_{в1} = (0{,}12 + 0{,}15p)\, b_{1ср} + 10. \qquad (5.64)$$

Если обмотка статора выполнена из жестких катушек (полукатушек), то длина одной лобовой части, мм,

$$l_{л1} = 50 + h_{z1} + \frac{t_1 y_1}{\sqrt{1 - [(b_{п1} + 3{,}5)/t_1]^2}}. \qquad (5.65)$$

Длину витка жесткой катушки определяют по (5.62).
Длина вылета лобовой части обмотки, мм,

$$l_{в1} = 25 + 0{,}5h_{z1} + \frac{y_1(b_{п1} + 3{,}5)/2t_1}{\sqrt{1 - [(b_{п1} + 3{,}5)/t_1]^2}}. \qquad (5.66)$$

Активное сопротивление фазы обмотки статора, приведенное к расчетной рабочей температуре, Ом,

$$r_1 = \rho_{Cu} w_1 l_{1ср} \cdot 10^3/n_{эл}\, a_1 q_{1эл}, \qquad (5.67)$$

где ρ_{Cu} — удельное электрическое сопротивление меди при расчетной рабочей температуре (см. табл. 2.1).

Активное сопротивление обмотки фазы статора в относительных единицах

$$r_{1*} = r_1 (I_{1ном}/U_{1ном}), \qquad (5.68)$$

где $I_{1ном}$ и $U_{1ном}$ — номинальные значения фазных тока и напряжения.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора обусловлено магнитным полем рассеяния, которое состоит из трех частей: пазового рассеяния, дифференциального рассеяния и рассеяния лобовых частей.

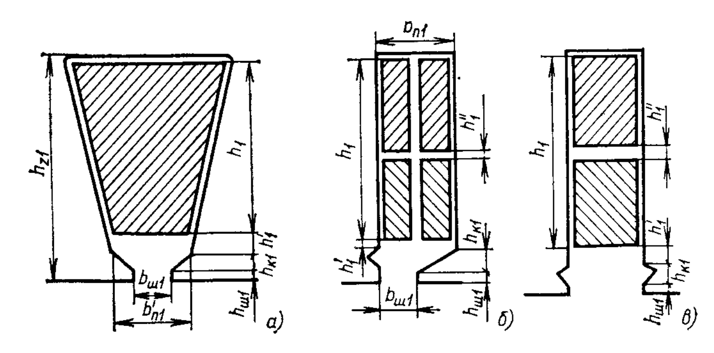


Рис. 5.12. К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния

Пазовое рассеяние обусловлено магнитным потоком рассеяния, направленным поперек паза и сцепленным с расположенными в этом пазу проводниками. Если обмотка выполнена с укороченным шагом ($y_1 < \tau$), то потокосцепление этой обмотки с потоком пазового рассеяния ослаблено.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния:
при трапецеидальном полузакрытом пазе (рис. 5.12, *а*)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1}{3b'_{п1}} k_\beta + \left(\frac{h'_1}{b'_{п1}} + \frac{3h_{к1}}{b'_{п1} + 2b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}}\right) k'_\beta; \qquad (5.69)$$

при прямоугольном полуоткрытом пазе (рис. 5.12, *б*)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1 - h''_1}{3b_{п1}} k_\beta + \left(\frac{h'_1}{b_{п1}} + \frac{3h_{к1}}{b_{п1} + 2b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}}\right) k'_\beta + \frac{h''_1}{4b_{п1}}; \qquad (5.70)$$

при прямоугольном открытом пазе (рис. 5.12, *в*)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1 - h''_1}{3b_{п1}} k_\beta + \frac{h'_1 + h_{к1} + h_{ш1}}{b_{п1}} k'_\beta + \frac{h''_1}{4b_{п1}}; \qquad (5.71)$$

здесь k_β и k'_β — коэффициенты, учитывающие укорочение шага обмотки $\beta = y_1/\tau$ (рис. 5.13).

Дифференциальное рассеяние — это рассеяние, создаваемое высшими гармоническими магнитного поля в воздушном зазоре.

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора

$$\lambda_{д1} = 0{,}9 t_1 (q_1 k_{об1})^2 k_{р,т1} k_{ш1} k_{д1}/\delta k_\delta , \quad (5.72)$$

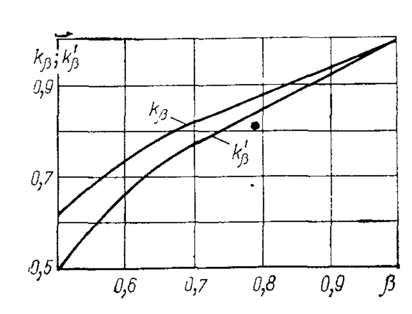


Рис. 5.13. К определению коэффициентов k_β и k'_β

где $k_{р,т1}$ — коэффициент, учитывающий демпфирующую реакцию токов, наведенных в обмотке короткозамкнутого ротора высшими гармониками поля статора (табл. 5.18); для двигателей с фазным ротором $k_{р,т1} = 1$; $k_{ш1}$ — коэффициент, учитывающий дополнительно к k_δ влияние открытия пазов статора на проводимость дифференциального рассеяния:

$$k_{ш1} = 1 - 0{,}033 b_{ш1}^2/t_1\delta; \quad (5.73)$$

$k_{д1}$ — коэффициент дифференциального рассеяния обмотки статора (табл. 5.19).

Таблица 5.18

q_1	Значения коэффициента $k_{р,т1}$ при z_2/p						
	10	15	20	25	30	35	40
2	0,99/0,94	0,94/0,87	—	—	—	—	—
3	0,98/0,92	0,93/0,87	0,88/0,84	0,85/0,78	—	—	—
4	—	0,90/0,81	0,84/0,77	0,80/0,75	0,77/0,72	—	—
5	—	—	—	0,75/0,69	0,72/0,67	0,70/0,65	—
6	—	—	—	0,70/0,62	0,66/0,60	0,62/0,58	—
8	—	—	—	—	—	0,53/0,47	0,51/0,46

Примечания: 1. В числителе указаны значения, относящиеся к двигателям, имеющим скос пазов $b_c \approx t_2$, а в знаменателе — к двигателям, не имеющим скоса пазов.

2. Для дробных значений q_1 и значений Z_2/p, отличающихся от указанных в таблице, коэффициент $k_{р,т1}$ следует определять интерполяцией.

Таблица 5.19

q_1	Значения коэффициента $k_{д1}$		
	Двухслойная обмотка с укороченным шагом		Однослойная обмотка с диаметральным шагом
	Двигатель с короткозамкнутым ротором	Двигатель с фазным ротором	
1,5	0,0450	0,0470	—
2	0,0235	0,0235	0,0285
2,5	0,0170	0,0180	—
3	0,0111	0,0111	0,0141
4	0,0062	0,0062	0,0089
5	0,0043	0,0043	0,0065
6	0,0030	0,0030	0,0052
8	0,0021	0,0021	—

Коэффициент воздушного зазора k_δ учитывает влияние зубчатости статора и ротора на магнитное сопротивление воздушного зазора:

$$k_\delta = k_{\delta1} k_{\delta2}. \quad (5.74)$$

Значения коэффициентов $k_{\delta1}$ и $k_{\delta2}$ при полузакрытых и полуоткрытых пазах статора и полузакрытых пазах ротора

$$k_{\delta1} = 1 + \frac{b_{ш1}}{t_1 - b_{ш1} + 5\delta t_1/b_{ш1}}; \quad (5.75)$$

$$k_{\delta2} = 1 + \frac{b_{ш2}}{t_2 - b_{ш2} + 5\delta t_2/b_{ш2}}. \quad (5.76)$$

При открытых пазах статора и ротора вместо $b_{ш1}$ и $b_{ш2}$ подставляют соответственно $b_{п1}$ и $b_{п2}$.

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей обмотки статора

$$\lambda_{л1} = 0{,}34 \frac{q_1}{l_1} (l_{л1} - 0{,}64\beta\tau). \quad (5.77)$$

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния обмотки статора

$$\lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}. \quad (5.78)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния одной фазы обмотки статора, Ом,

$$x_1 = \frac{1{,}58 f_1 l_1 w_1^2}{p q_1 \cdot 10^8} \lambda_1. \quad (5.79)$$

В относительных единицах

$$x_{1*} = x_1 I_{1ном}/U_{1ном}. \quad (5.80)$$

5.5. КОРОТКОЗАМКНУТАЯ ОБМОТКА РОТОРА

Короткозамкнутая обмотка (клетка) ротора асинхронных двигателей с высотой оси вращения $h \leqslant 355$ мм выполняется из алюминия путем заливки сердечника ротора. Поэтому размеры и форма стержней этой обмотки определяются размерами и формой пазов сердечника ротора (см. рис. 5.7, *а—г*).

Номинальный ток в обмотке ротора, А,

$$I_2 = 1{,}1 I_{1ном} \frac{m_1 w_1 k_{об1}}{m_2 w_2 k_{об2}} \cos\varphi_1', \quad (5.81)$$

где $\cos\varphi_1'$ принимается по рис. 5.1.

При короткозамкнутой обмотке ротора $m_2 = z_2$; $w_2 = 0{,}5$; $k_{об2} = 1$ и ток в стержне ротора, А, в номинальном режиме равен

$$I_{ст} = I_2 = 1{,}1 I_{ном} \frac{6 w_1 k_{об1}}{z_2} \cos\varphi_1'. \quad (5.82)$$

Плотность тока в стержне ротора, А/мм²,

$$\Delta_2 = I_2 / q_{ст}, \quad (5.83)$$

где $q_{ст}$ — сечеиие стержня, мм², равное площади паза ротора в штампе, $q_{ст} = S_{п2}$.

Плотность тока в стержне короткозамкнутой обмотки ротора при заливке пазов алюминием не должна превышать $\Delta_2 = 2{,}5 \div 3{,}5$ А/мм² для двигателей закрытого обдуваемого исполнения или $\Delta_2 = 3{,}0 \div 4{,}0$ А/мм² для двигателей защищенного исполнения. Здесь меньшие значения Δ_2 относятся к двигателям большей мощности.

Размеры короткозамыкающего кольца литой клетки ротора (рис. 5.14) определяются выражениями:

поперечное сечение кольца, мм²,

$$q_{кл} = (0{,}35 \div 0{,}45) Z_2 q_{ст} / 2p; \quad (5.84)$$

высота кольца, мм,

$$h_{кл} = (1{,}1 \div 1{,}25) h_{z2}; \quad (5.85)$$

длина кольца

$$l_{кл} = q_{кл} / h_{кл}; \quad (5.86)$$

средний диаметр кольца, мм,

$$D_{кл,ср} = D_2 - h_{кл}. \quad (5.87)$$

Овальные полузакрытые и закрытые пазы (рис 5.7, *а — в*). *Активное* сопротивление стержня клетки ротора, Ом, приведенное к расчетной рабочей температуре,

$$r_{ст} = \rho_{Al} l_2 k_{в,т} \cdot 10^3 / q_{ст}, \quad (5.88)$$

где ρ_{Al} — удельное электрическое сопротивлеиие литой алюминиевой клетки при расчетной рабочей температуре, Ом·м (см. табл. 2.1); $k_{в,т}$ — коэффициент, учитывающий вытеснение тока в стержне.

Коэффициент $k_{в,т}$ представляет собой отношение площади поперечного сечения стержня $q_{ст}$ к площади сечения стержня при расчетной глубине проникновения тока $q_{г,п}$:

$$k_{в,т} = q_{ст} / q_{г,п}. \quad (5.89)$$

Расчет коэффициента $k_{в,т}$ ведется лишь для пускового режима, так как в рабочем режиме частота тока в клетке ротора незначительна и поэтому $q_{г,п} = q_{ст}$ и $k_{в,т} = 1$.

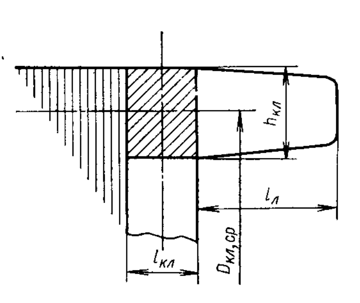


Рис. 5.14. Размеры короткозамыкающего кольца литой клетки ротора

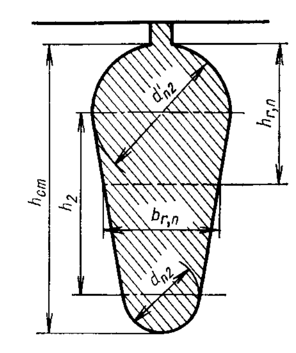


Рис. 5.15. Стержень овального паза короткозамкнутой обмотки ротора

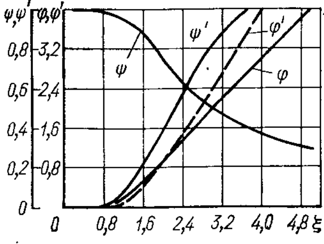


Рис. 5.16. К определению коэффициентов φ, ψ и ψ'

Глубина проникновения тока в стержень (рис. 5.15), мм,

$$h_{г,п} = h_{ст} / (1 + \varphi), \quad (5.90)$$

где φ — коэффициент, определяется по кривым рис. 5.16 в зависимости от значений коэффициента ξ, который характеризует степень повышения активного сопротивления клетки ротора.

При $f_1 = 50$ Гц для алюминиевой литой клетки значения ξ при расчетных температурах 75 и 115 °С соответственно равны

$$\xi_{75} = 0{,}066 h_{ст} \sqrt{s}; \quad \xi_{115} = 0{,}064 h_{ст} \sqrt{s}, \quad (5.91)$$

где s — скольжение.

Ширина стержня на расчетной глубине проникновения тока, мм

$$b_{г,п} = d_{п2}' - \frac{(d_{п2}' - d_{п2})}{h_2} \left(h_{г,п} - \frac{d_{п2}'}{2} \right). \quad (5.92)$$

Площадь поперечного сечения стержня при расчетной глубине проникновения тока, мм²,

$$q_{г,п} = 0,393d'^2_{п2} + \left[0,5\left(d'_{п2} + b_{г,п}\right)\left(h_{г,п} - 0,5d'_{п2}\right)\right]. \qquad (5.93)$$

Активное сопротивление участка короткозамыкающего кольца между двумя соседними стержнями при расчетной рабочей температуре, Ом,

$$r_{кл} = 2\pi D_{кл,ср}\,\rho_{A1}\cdot 10^3/Z_2 q_{кл}, \qquad (5.94)$$

где ρ_{A1} принимается по табл. 2.1 для литой алюминиевой клетки, Ом·м.

Активное сопротивление колец, приведенное к току стержня, Ом,

$$r''_{кл} = r_{кл}/k^2_{пр2}, \qquad (5.95)$$

где $k_{пр2}$ — коэффициент приведения тока кольца к току стержня:

при $Z_2/2p<6$

$$k_{пр2} = 2\sin(180°p/Z_2); \qquad (5.96)$$

при $Z_2/2p \geqslant 6$

$$k_{пр2} \approx 2\pi p/Z_2. \qquad (5.97)$$

Коэффициент скоса пазов ротора $k_{ск}$ определяется по центральному углу скоса $\alpha_{ск}$ (табл. 5.20), рад,

$$\alpha_{ск} = \pi\cdot 2p\beta_{ск}/Z_2, \qquad (5.98)$$

где $\beta_{ск}$ — скос пазов в долях зубцового деления t_2.

Таблица 5.20

$\alpha_{ск}$	$k_{ск}$	$\alpha_{ск}$	$k_{ск}$	$\alpha_{ск}$	$k_{ск}$	$\alpha_{ск}$	$k_{ск}$
0	1,0	0,5	0,991	1,0	0,959	1,5	0,909
0,1	1,0	0,6	0,986	1,1	0,951	1,6	0,897
0,2	0,999	0,7	0,980	1,2	0,941	1,7	0,884
0,3	0,998	0,8	0,974	1,3	0,932	1,8	0,870
0,4	0,995	0,9	0,967	1,4	0,921	1,9	0,856

Для двигателей с $2p=2$ при скосе пазов ротора на одно зубцовое деление статора принимают $k_{ск}=1$.

Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом,

$$r'_2 = k_{пр1}\left(r_{ст} + r''_{кл}\right); \qquad (5.99)$$

в относительных единицах

$$r'_{2*} = r'_2\left(I_{1ном}/U_{1ном}\right). \qquad (5.100)$$

Коэффициент приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора

$$k_{пр1} = 4\left(m_1/Z_2\right)\left(w_1 k_{об}/k_{ск}\right)^2. \qquad (5.101)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора обусловлено следующими видами рассеяния: пазовым, лобовым, дифференциальным и рассеянием скоса пазов.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора:

овального полузакрытого паза (см. рис. 5.7, *а*)

$$\lambda_{п2} = C_\lambda + \left(h_{ш2}/b_{ш2}\right); \qquad (5.102)$$

овального закрытого паза (см. рис. 5.7, *б*, *в*)

$$\lambda_{п2} = C_\lambda + 0,3 + \left(1,12h_{м2}\cdot 10^3/I_2\right), \qquad (5.103)$$

где

$$C_\lambda = \psi\left[\frac{h_2 + 0,4d_{п2}}{3d'_{п2}}\left(1 - \frac{\pi d'^2_{п2}}{8q_{ст}}\right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш2}}{2d'_{п2}}\right]. \qquad (5.104)$$

Коэффициент ψ, учитывающий уменьшение проводимости пазового рассеяния при вытеснении тока в процессе пуска, определяют по рис. 5.16. Для номинального режима $\psi=1$.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{д2} = 0,9t_2\left(Z_2/6p\right)^2 k_{д2}/\delta k_\delta, \qquad (5.105)$$

где $k_{д2}$ — коэффициент дифференциального рассеяния ротора, определяют по рис. 5.17 в зависимости от q_2:

$$q_2 = Z_2/3\cdot 2p. \qquad (5.106)$$

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния короткозамыкающих колец литой клетки ротора

$$\lambda_{кл} = \frac{2,3D_{кл,ср}}{Z_2\, l_2\, k^2_{пр2}} \lg\frac{4,7D_{кл,ср}}{2h_{кл} + 2l_{кл}}. \qquad (5.107)$$

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния скоса пазов ротора

$$\lambda_{ск} = t_2\beta^2_{ск}/9,5\delta k_\delta k'_\mu, \qquad (5.108)$$

где k'_μ — предварительное значение коэффициента насыщения магнитной цепи, принимают равным 1,2—1,4.

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния обмотки ротора

$$\lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ск}. \qquad (5.109)$$

Индуктивное спротивление рассеяния обмотки ротора, Ом,

$$x_2 = 7,9f_1 l_2 \lambda_2\cdot 10^{-9}. \qquad (5.110)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом,

$$x'_2 = k_{пр1} x_2, \qquad (5.110а)$$

где $k_{пр1}$ определяют по (5.101); в относительных единицах

$$x'_{2*} = x'_2\,(I_{1ном}/U_{1ном}). \tag{5.111}$$

Бутылочные закрытые пазы (см. рис. 5.7, *г*). Высоту верхней части паза выбирают такой, что вытеснение тока в ней практически отсутствует. *Активное* сопротивление стержня в этой части паза при расчетной рабочей температуре, Ом,

$$r_{ст.в} = \rho_{Al}\, l_2 \cdot 10^3/q_{ст.в}. \tag{5.112}$$

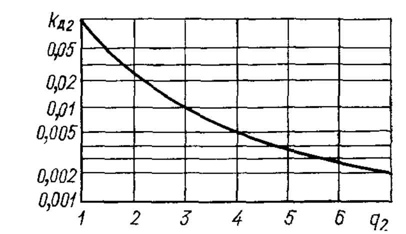


Рис. 5.17. К определению коэффициента $k_{д2}$

Для нижней части стержня ($q_{ст.н}$) вытеснение тока учитывают только при $\xi > 1$ [см. (5.91)]. Активное сопротивление этой части стержня, Ом,

$$r_{ст.н} = \rho_{Al}\, l_2\, k_{в.т.н} \cdot 10^3/q_{ст.н}, \tag{5.113}$$

где $k_{в.т.н}$ — коэффициент вытеснения тока в нижней части стержня, расчет которого ведется лишь при пуске двигателя; для номинального режима $k_{в.т.н}=1$. Коэффициент $k_{в.т.н}$ рассчитывается так же, как и $k_{в.т}$ для стержня с овальным пазом, при этом расчетную глубину проникновения в нижней части стержня определяют как разность, мм,

$$h_{г.п.н} = h_{г.п} - (h'_2 + 0{,}5d'_{п2}), \tag{5.114}$$

где $h_{г.п}$ — глубина проникновения тока в стержень, рассчитанная по (5.90) с заменой φ на φ' (см. рис. 5.16).

В дальнейшем расчете по (5.89), (5.92) и (5.93) величины $k_{в.т}$, $q_{ст}$ и $q_{г.п}$ заменяют соответственно на $k_{в.т.н}$, $q_{ст.н}$ и $q_{г.п.н}$. Активное сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня, определяют по (5.94), (5.95).

Активное сопротивление верхней части клетки, приведенное к статору, Ом,

$$r'_в = k_{пр1}\, r_{ст.в}. \tag{5.115}$$

Для определения $k_{пр1}$ следует воспользоваться выражением (5.101), но при этом нужно принять $k_{ск}=1$, так как бутылочные пазы на роторе применяются в двигателях с высотой оси вращения $h \geqslant 250$ мм, у которых скоса пазов не делают.

Активное сопротивление нижней части клетки, приведенное к статору, Ом,

$$r'_н = k_{пр1}\, r_{ст.н}. \tag{5.116}$$

Активное сопротивление участка короткозамыкающих колец между двумя стержнями, приведенное к току стержня $r''_{кл}$, определяют по (5.94) и (5.95), а затем это сопротивление приводят к статору:

$$r'_{кл} = k_{пр1}\, r''_{кл}. \tag{5.117}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния нижней части клетки (см. рис. 5.7, *д*)

$$\lambda_{п2н} = \left[\frac{h_2 + 0{,}4d'_{п2}}{3d_{п2}}\left(1 - \frac{\pi d^2_{п2}}{8q_{ст.н}}\right)^2 + 0{,}66 - \frac{b_{ш2}}{2d_{п2}}\right]\psi' + \frac{h'_2 - 0{,}18}{2b_{п2}}, \tag{5.118}$$

где ψ' — коэффициент, характеризующий уменьшение проводимости пазового рассеяния нижней части клетки вследствие явления вытеснения тока. Значение ψ' определяют по рис. 5.16, при этом ξ рассчитывают по (5.91) для всей высоты стержня, при $\xi \geqslant 1$ коэффициент $\psi'=1$.

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния взаимной индукции нижней и верхней частей стержня (см. рис. 5.7, *д*)

$$\lambda_{2н.в} = \frac{h'_2 - 0{,}1b_{п2}}{2b_{п2}} + 1{,}09 + 1{,}12\,\frac{h_{м2}}{I_2}\,10^3, \tag{5.119}$$

где I_2 — суммарный ток нижней и верхней частей стержня, А.

Ток I_2 с некоторым приближением можно рассчитать по (5.82).

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния $\lambda_{д2}$ определяют по (5.105), а коэффициент магнитной проводимости рассеяния короткозамыкающих колец $\lambda_{кл}$ — по (5.107). Коэффициент проводимости магнитного рассеяния общей цепи ротора

$$\lambda_{20} = \lambda_{2н.в} + \lambda_{д2} + \lambda_{кл}. \tag{5.120}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния нижней части клетки, приведенное к статору, Ом,

$$x'_н = x_1\, \lambda'_{2н}/\lambda_1, \tag{5.121}$$

где $\lambda'_{2н}$ — приведенный коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки:

$$\lambda'_{2н} = \lambda_{2н}\, k^2_{об1}\, l_2 Z_1/l_1 Z_2. \tag{5.122}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния общей цепи ротора, приведенное к статору, Ом,

$$x'_0 = x_1\, \lambda'_{20}/\lambda_1, \tag{5.123}$$

где

$$\lambda'_{20} = \lambda_{20}\, k^2_{об1}\, l_2 Z_1/l_1 Z_2. \tag{5.124}$$

Результирующее сопротивление обмотки ротора, приведенное к статору, определяется в соответствии со схемой замещения ротора с бутылочными пазами (рис. 5.18).

Результирующее активное сопротивление обмотки ротора, Ом,

$$r_2' = \frac{1}{s}\left(r_{кл}' + \frac{r_н' r_в'}{r_н' + r_в'}\right). \qquad (5.125)$$

При $s=1$ активное сопротивление нижней части стержня $r_н' = \infty$ и поэтому

$$r_{2п}' = r_{кл}' + r_в'. \qquad (5.125а)$$

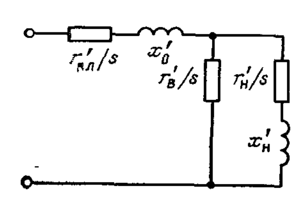


Рис. 5.18. Схема замещения обмотки ротора с бутылочными пазами

Результирующее индуктивное сопротивление рассеяния, Ом,

$$x_2' = x_0 + x_н'\left(\frac{S_{п2,н}}{S_{п2н} + S_{п2в}}\right)^2, \qquad (5.126)$$

где $S_{п2н}$ и $S_{п2в}$ определяют соответственно по (5.36) и (5.38).

5.6. ОБМОТКА ФАЗНОГО РОТОРА

Асинхронные двигатели серии 4А с фазным ротором изготавливают с высотами оси вращения $h=160\div355$ мм и числом полюсов $2p=4\div12$. Обмотка ротора такого двигателя трехфазная, соединенная в звезду с числом параллельных ветвей $a_1=1$.

В двигателях с $h=160\div200$ мм обмотка фазного ротора двухслойная петлевая с мягкими катушками. Пазы на роторе этих двигателей полузакрытые трапецеидальные (рис. 5.19, *а*). В двигателях с $h=225\div355$ мм обмотка фазного ротора двухслойная волновая из медных изолированных стержней прямоугольного сечения. Пазы ротора этих двигателей полузакрытые прямоугольные (рис. 5.19, *б*).

Высоту спинки ротора h_{c2} определяют по (5.27), принимая индукцию B_{c2} по табл. 5.21, а затем находят высоту зубца h_{z2} по (5.26).

Наименьшую (расчетную) ширину зубца ротора определяют по (5.24), принимая индукцию B_{z2max} по табл. 5.21, а ширину паза, мм,

$$b_{п2} = t_2' - b_{z2min},$$

где $t_2' = \pi(D_2 - 2h_{z2})/Z_2$.

Таблица 5.21

h, мм	$2p$	Рекомендуемые значения магнитной индукции, Тл, в двигателях с фазным ротором при исполнении по способу защиты IP44	
		B_{z2max}	B_{c2}
160—355	4 6, 8, 10, 12	1,60—1,90 1,60—1,90	1,25—1,35 0,5—0,7

Примечание. Для двигателей исполнения IP23 значения магнитной индукции следует увеличить на 10 %.

При трапецеидальных полузакрытых пазах ширина шлица $b_{ш2}=3{,}7$ мм, а его высота $h_{ш2}=1{,}0$ мм; при прямоугольных полузакрытых пазах $b_{ш2}=1{,}5$ мм, а $h_{ш2}=0{,}6$ мм.

Конструкция системы изоляции обмоток с фазным ротором представлена в табл. 5.22 и 5.23.

Для выбора числа пазов на полюс и фазу q_2 обмотки фазного ротора асинхронных двигателей с $h=160\div355$ мм можно воспользоваться табл. 5.24, составленной для принятых в соответствии с рекомендациями табл. 5.8 чисел пазов статора Z_1.

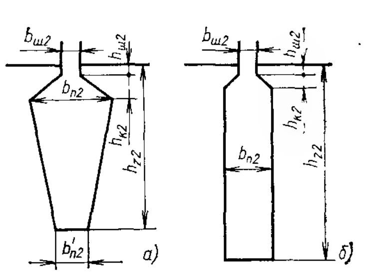


Рис. 5.19. Пазы фазного ротора

Число витков в обмотке фазы ротора

$$w_2 = 2pq_2. \qquad (5.127)$$

На рис. 5.20, *а* показана развернутая схема одной фазы двухслойной волновой обмотки ротора. Обмотка состоит из двух ветвей, соединенных последовательно перемычками. Всего таких перемычек в трехфазной обмотке три: I—II: III—IV и V—VI. Возможна схема обмотки и без указанных перемычек (рис. 5.20, *б*). Достигается это тем, что в пазах *2*, *14* и *26* вместо двух стержней расположено по одному «косому» стержню (рис. 5.20, *в*). Паз с «косым» стержнем должен быть сдвинут относительно паза с начальным стержнем этой обмотки на $y_к=(2Z_2/3p)-1$ паз в обратном направлении хода обмотки, в данном случае $y_к=11$. Концы фаз, соединяемых в нулевую точку, расположены со стороны, противоположной контактным кольцам. При q_2, равном целому числу, шаг обмотки диаметральный, он равен

$$y_2 = Z_2/2p, \qquad (5.128)$$

а шаг в конце обхода по окружности ротора, укороченный на один паз,

$$y_2' = (Z_2/2p) - 1. \qquad (5.129)$$

При дробном q_2, например 4,5 или 3,5, обмотку выполняют с чередующимися шагами: одна секция имеет шаг (со стороны контактных колец)

$$y_2' = (Z_2/2p) - 0{,}5, \qquad (5.130)$$

а следующая за ней секция имеет шаг (со стороны, противоположной контактным кольцам)

$$y_2'' = (Z_2/2p) + 0{,}5. \qquad (5.131)$$

Таким образом, две следующие друг за другом секции обмотки имеют суммарный шаг, равный двойному полюсному делению:

$$y_2' + y_2'' = 2Z_2/2p = 2\tau. \qquad (5.132)$$

В конце обхода каждой фазы последнюю секцию делают с шагом, укороченным на один паз. Выполненная таким образом обмотка является обмоткой с укороченным шагом. Относительный шаг β, коэффициенты распределения $k_{р2}$, укорочения $k_{у2}$ и обмоточный $k_{об2}$ для рассмотренной обмотки определяют так же, как и для двухслойной обмотки статора (см. § 5.3). Значения обмоточного коэффициента для рекомендованных значений Z_2 приведены в табл. 5.24.

Напряжение на контактных кольцах двигателя, В,

$$U_{к,к} = \sqrt{3} E_2 \leqslant 1200, \qquad (5.133)$$

где E_2 — ЭДС одной фазы обмотки ротора, В:

$$E_2 = k_E U_1 \left[k_{об2} w_2 / k_{об1} w_1\right]. \qquad (5.134)$$

Значения k_E принимают от 0,94 до 0,98, при этом большие значения коэффициента соответствуют меньшему числу полюсов $2p$.

Площадь поперечного сечения стержня обмотки ротора, мм^2,

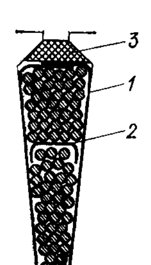


Таблица 5.22. Конструкция системы изоляции и элементов крепления всыпной обмотки фазного ротора двигателей с h=160÷200 мм (класс нагревостойкости F)

Позиция на рисунке	Наименование	Материал: Наименование, марка	Материал: Толщина, мм	Число слоев
1	Коробка пазовая	Пленколакослюдопласт ГИП-ЛСП-ПЛ	0,4	1
		Стеклолакоткань ЛСК-155/180 *	0,15	1
2	Прокладка междуслойная	Пленколакослюдопласт ГИП-ЛСП-ПЛ	0,4	1
—	Прокладка междуфазовая в лобовых частях	То же	0,4	1
3	Клин пазовый	Стеклотекстолит СТЭФ-1	—	—
—	Изоляция внутримашинных соединений и выводных концов	Трубка изоляционная ТКСП или ТКР	—	—
—	Бандаж лобовых частей	Стеклолента бандажная ЛСБ-Г	0,2	—
—	Пропитка	Лак ПЭ-993	—	—
—	Покрытие лобовых частей	Эмаль ЭП-91	—	—

* Только для двигателей с h=200 мм.

$$q_{ст2} = I_2 / \Delta_2, \qquad (5.135)$$

где Δ_2 — плотность тока в обмотке фазного ротора, А/мм^2.

Ток I_2 определяют по (5.81), принимая $m_2 = m_1 = 3$. Для двигателей с исполнением по степени защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 Δ_2=4,5÷5,5 А/мм^2, а для двигателей с исполнением по

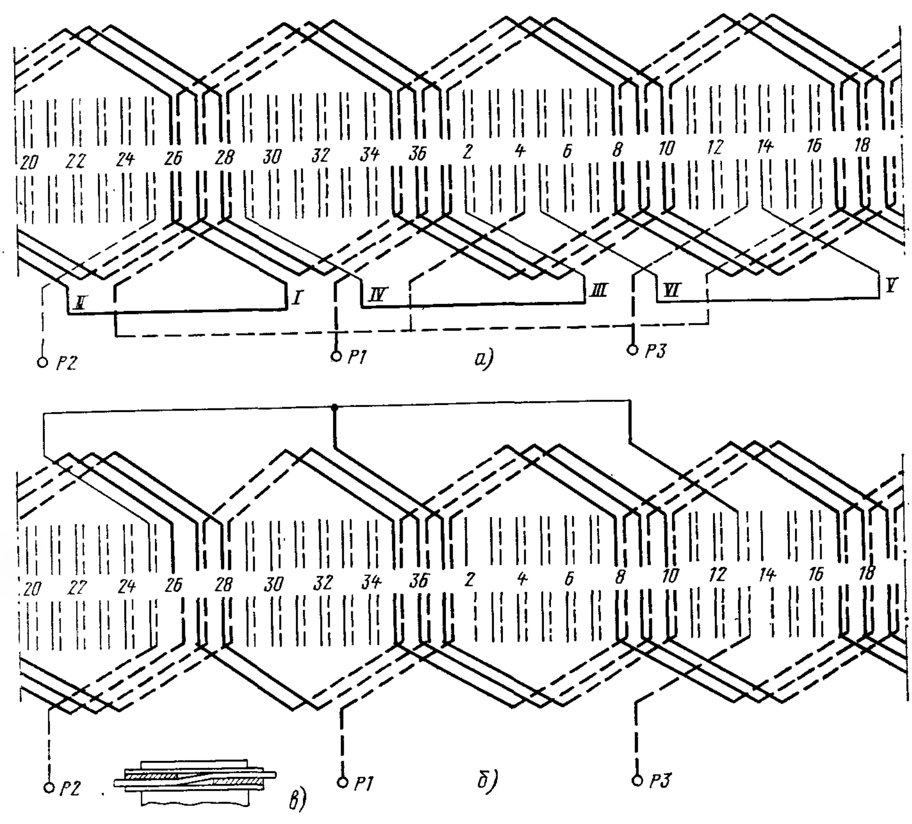


Рис. 5.20. Развернутые схемы двухслойных волновых обмоток фазного ротора (Z_2=36, $2p$=4, q_2=3, a=1):

а — схема с соединительными перемычками между ветвями обмотки; *б* — схема без соединительных перемычек с косыми стержнями; *в* — расположение косого стержня в пазу

степени защиты IP23 и способом охлаждения IC01 указанные выше значения следует увеличить на 20 %.

По рассчитанному значению поперечного сечения стержня $q_{ст2}$ выбирают проводник стандартного прямоугольного сечения с размерами a и b (см. табл. П.1.2). Затем выполняют чертеж паза и составляют его спецификацию, руководствуясь табл. 5.22 и 5.23. При определении размеров паза ротора необходимо контролировать магнитные индукции в спинке ротора $B_{с2}$ и в расчетном сечении

зубца B_{z2max}, которые не должны превышать допустимых значений (см. табл. 5.21).

Средняя ширина катушки обмотки фазного ротора, мм,

$$b_{c,ср} = t_{2ср} y_{2ср}, \qquad (5.136)$$

где $t_{2ср}$ — среднее зубцовое деление ротора, мм:

$$t_{2ср} = \pi (D_2 - h_{z2})/Z_2; \qquad (5.137)$$

$y_{2ср}$ — средний шаг обмотки ротора, выражается числом пазов:

$$y_{2ср} = 0,5\,(y_2' + y_2''). \qquad (5.137а)$$

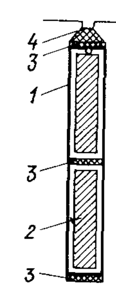


Таблица 5.23. Конструкция системы изоляции и элементы крепления стержневой обмотки фазного ротора двигателей с h=225÷355 мм (класс нагревостойкости F)

Позиция на рисунке	Наименование	Материал: Наименование, марка	Материал: Толщина, мм	Число слоев
1	Коробка пазовая	Пленкостеклоткань Г-ТП-2ПХ-ПЭ-942 *	0,17	1
		Стеклолакоткань ЛСП-130/155 **	0,15	1
2	Изоляция пазовой части стержня	Пленкосинтофолий ПСФ-Ф *	0,15	3¹/₄
		Лента слюдиниитовая ЛСЭП-934-ТПл **	0,13	6
—	Изоляция лобовой части стержня	Лента стеклослюдопластовая ЛИФ-ПЭ-934-ТП *	0,13	1 (вполнахлеста)
		Лента слюдиниитовая ЛСЭП-934-ТПл **	0,13	»
		Лента стеклянная ЛЭС	0,1	»
3	Прокладка	Стеклотекстолит СТЭФ-1	0,5	1
4	Клин пазовый	То же	—	—
—	Прокладка междуслойная в лобовых частях	Стеклослюдопласт ГИП-Т-ЛСП	0,45	2
		Лента стеклянная ЛЭС	0,2	2
—	Бандаж лобовых частей	Стеклолента бандажная ЛСБ-Г	0,2	—
—	Пропитка	Лак ПЭ-993 *	—	—
		Лак КО-964и **	—	—
—	Покрытие лобовых частей	Эмаль ЭП-91	—	—

* Для двигателей с h=225÷250 мм.
** Для двигателей с h=280÷355 мм.

Таблица 5.24

h, мм	$2p$	Z_2	q_2	y_2	$k_{об2}$
160—200	4	36	3	7	0,902
	6	54	3	7	0,902
	8	48	2	5	0,903
225	4	66	5,5	17; 16	0,954
	6	81	4,5	14; 13	0,954
	8	84	3,5	11; 10	0,955
250	4	72	6	18	0,956
	6	81	4,5	14; 13	0,954
	8	84	3,5	11; 10	0,955
280—355	4	72	6	18	0,956
	6	81	4,5	14; 13	0,954
	8	84	3,5	11; 10	0,955
	10	120	4	12	0,958
	12	108	3	9	0,960

Средняя длина лобовой части катушки, мм,

$$l_{л2} = \frac{b_{к,ср}}{\sqrt{1 - [(b_{п2} + 3,5)/t_{2ср}]^2}} + h_{z2} + C_л, \qquad (5.138)$$

где $C_л$=50 мм при $U_{к,к}$<750 В и $C_л$=70 мм при $U_{к,к}$=750÷÷1200 В.

Средняя длина витка обмотки ротора, мм,

$$l_{2ср} = 2\,(l_2 + l_{л2}). \qquad (5.139)$$

Вылет лобовой части обмотки ротора, мм,

$$l_{2в} = \frac{b_{к,ср}}{2} \frac{(b_{п2} + C_{в2})/t_{2ср}}{\sqrt{1 - [(b_{п2} + C_{в2})/t_{2ср}]^2}} + \frac{h_{z2}}{2} + C_{в2}', \qquad (5.140)$$

где $C_{в2}$=3,5 и $C_{в2}'$=25 при $U_к$<750 В; $C_{в2}$=5 и $C_{в2}'$ =35 при $U_к$=750÷1200 В.

Далее определяем параметры фазного ротора [1].

Активное сопротивление одной фазы обмотки ротора при расчетной рабочей температуре, Ом,

$$r_2 = \rho_{Cu}\, l_{ср2}\, w_2 \cdot 10^3/q_{ст2}, \qquad (5.141)$$

где ρ_{Cu}, Ом·м, принимается по табл. 2.1.

Активное сопротивление обмотки фазы ротора, приведенное к статору, Ом,

$$r_2' = k_{пр1ф}\, r_2, \qquad (5.142)$$

где $k_{\text{пр1ф}}$ — коэффициент приведения фазной обмотки ротора:

$$k_{\text{пр1ф}} = (w_1 k_{\text{об1}}/w_2 k_{\text{об2}})^2. \qquad (5.143)$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора в относительных единицах

$$r'_{2*} = r'_2 (I_{1\text{ном}}/U_{1\text{ном}}). \qquad (5.144)$$

Коэффициент магнитного рассеяния паза фазного ротора определяют по формуле, аналогичной (5.70), в которой размеры, соответствующие рис. 5.12, *б*, заменены размерами (рис. 5.21):

$$\lambda_{\text{п2}} = \frac{h_2 - h''_2}{3b_{\text{п2}}} k_\beta + \left(\frac{h'_2}{b_{\text{п2}}} + \frac{3h_{\text{к2}}}{b_{\text{п2}} + 2b_{\text{ш2}}} + \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш2}}}\right) k'_\beta + \frac{h''_2}{4b_{\text{п2}}}. \qquad (5.145)$$

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{\text{д2}} = 0{,}9 t_2 (q_2 k_{\text{об2}})^2 k_{\text{ш2}} k_{\text{д2ф}}/\delta k_\delta, \qquad (5.145а)$$

где $k_{\text{ш2}}$ — коэффициент, учитывающий влияние шлица паза ротора на проводимость дифференциального рассеяния:

$$k_{\text{ш2}} = 1 - 0{,}033 b^2_{\text{ш2}}/t_2\delta; \qquad (5.146)$$

$k_{\text{д2ф}}$ — коэффициент дифференциального рассеяния фазного ротора, определяется в зависимости от q_2:

q_2	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
$k_{\text{д2ф}}$	0,0111	0,0079	0,0062	0,0051	0,0043	0,0036	0,0030

Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки фазного ротора

$$\lambda_{\text{л2}} = 0{,}34 \frac{q_2}{l_2} (l_{\text{л2}} - 0{,}64\beta\tau). \qquad (5.147)$$

Коэффициент проводимости рассеяния обмотки фазного ротора

$$\lambda_2 = \lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{л2}}. \qquad (5.147а)$$

Индуктивное сопротивление обмотки фазного ротора, Ом,

$$x_2 = \frac{1{,}58 f_1 l_2 w_2^2}{p q_2 \cdot 10^8} \lambda_2. \qquad (5.148)$$

Индуктивное сопротивление ротора, приведенное к статору, Ом,

$$x'_2 = k_{\text{пр1ф}} x_2; \qquad (5.149)$$

в относительных единицах

$$x'_{2*} = x'_2 (I_{1\text{ном}}/U_{1\text{ном}}). \qquad (5.150)$$

Рис. 5.21. Размеры прямоугольного паза фазного ротора со стержнями обмотки

5.7. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчет магнитной цепи асинхронного двигателя проводится в целях определения МДС и намагничивающего тока статора, необходимых для создания в двигателе требуемого магнитного потока. Магнитная система двигателя представляет собой разветвленную симметричную магнитную цепь, содержащую $2p$ полюсов. Поэтому расчет магнитной цепи ведется по ее расчетному участку, содержащему одну пару полюсов. На рис. 5.22 представлен расчетный участок магнитной цепи четырехполюсной машины, который

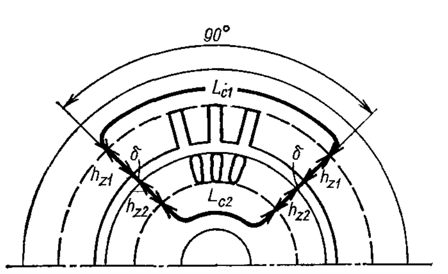


Рис. 5.22. Расчетная часть магнитной цепи четырехполюсного асинхронного двигателя

состоит из пяти последовательно соединенных участков: воздушного зазора δ, зубцовых слоев статора h_{z1} и ротора h_{z2}, спинки статора L_{c1} и спинки ротора L_{c2}. Поэтому МДС обмотки статора на пару полюсов ΣF определяется как сумма магнитных напряжений всех перечисленных участков магнитной цепи: воздушного зазора F_δ, зубцов статора F_{z1} и ротора F_{z2}, спинки статора F_{c1} и спинки ротора F_{c2}, А:

$$\Sigma F = 2F_\delta + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{c1} + F_{c2}. \qquad (5.151)$$

Воздушный зазор. Магнитное напряжение воздушного зазора, А,

$$F_\delta = 0{,}8 B_\delta \delta k_\delta \cdot 10^3, \qquad (5.152)$$

где k_δ — коэффициент воздушного зазора по (5.74); B_δ — уточненное значение магнитной индукции, Тл, по (5.57).

Зубцовый слой статора. При *трапецеидальных полузакрытых пазах* статора (рис. 5.6, *а*) магнитная индукция в зубце одинакова по высоте зубца, Тл:

$$B_{z1} = B_\delta t_1/k_{c1} b_{z1}. \qquad (5.153)$$

Если $B_{z1} \leqslant 1{,}8$ Тл, то напряженность магнитного поля в зубце H_{z1} определяют по таблицам намагничивания для зубцов (см. приложение П.2) в зависимости от принятой марки электротехнической стали (см. табл. 5.6). Если же $B_{z1} > 1{,}8$ Тл, то H_{z1} определяют по кривым намагничивания для зубцов в зависимости от марки стали (рис. П.2.1 и П.2.2) и коэффициента $k_{\text{п1}}$, учитывающего ответвление части магнитного потока в паз статора,

$$k_{\text{п1}} = t_{1(1/3)}/b_{z1} k_{c1}, \qquad (5.154)$$

где $t_{1(1/3)}$ — зубцовое деление статора на высоте $^1/_3$ зубца статора, считая от наиболее узкой его части, мм:

$$t_{1(1/3)} = \pi (D_1 + {}^2/_3 h_{z1})/Z_1. \qquad (5.155)$$

Магнитное напряжение зубцового слоя статора, А,

$$F_{z1} = H_{z1} h_{z1} \cdot 10^{-3}. \qquad (5.156)$$

При прямоугольных полуоткрытых и открытых пазах статора (рис. 5.6, *б* и *в*) магнитная индукция в минимальном сечении зубца b_{z1} равна, Тл,

$$B_{z1max} = B_\delta t_1 / k_{c1} b_{z1min}. \qquad (5.157)$$

При $B_{z1max} \leqslant 1{,}8$ Тл напряженность поля H_{z1} определяют по таблицам намагничивания для зубцов (см. приложение П.2) по магнитной индукции в сечении зубца на высоте $^1/_3$ наиболее узкой его части, Тл,

$$B_{z1(1/3)} = B_\delta t_1 / k_{c1} b_{z1(1/3)}, \qquad (5.158)$$

где $b_{z1(1/3)}$ — ширина зубца в расчетном сечении:

$$b_{z1(1/3)} = [\pi (D_1 + {}^2/_3 h_{z1}) / Z_1] - b_{п1}. \qquad (5.159)$$

При $B_{z1} > 1{,}8$ Тл напряженность поля определяют в трех поперечных сечениях зубца: минимальном, шириной b_{z1min} (5.20), максимальном

$$b_{z1max} = t'_1 - b_{п1} \qquad (5.160)$$

и среднем

$$b_{z1ср} = 0{,}5 (b_{z1max} + b_{z1min}). \qquad (5.161)$$

Максимальное зубцовое деление, мм,

$$t'_1 = \pi (D_1 + 2h_{z1}) / Z_1. \qquad (5.162)$$

Магнитная индукция в максимальном и среднем сечениях зубца, Тл,

$$B_{z1min} = B_\delta t_1 / k_{c1} b_{z1max}; \qquad (5.163)$$

$$B_{z1ср} = B_\delta t_1 / k_{c1} b_{z1ср}. \qquad (5.164)$$

Затем по кривым намагничивания для зубцов (см. приложение П.2) определяют напряженность поля H_{z1max}, $H_{z1ср}$ и H_{z1min}, при этом расчет коэффициентов, учитывающих ответвление магнитного потока в паз, ведут по формулам:

для B_{z1max}

$$k_{п1max} = t_1 / b_{z1min} k_{c1}; \qquad (5.165)$$

для B_{z1min}

$$k_{п1min} = t'_1 / b_{z1max} k_{c1}; \qquad (5.166)$$

для $B_{z1ср}$

$$k_{п1ср} = 0{,}5 (k_{п1max} + k_{п1min}). \qquad (5.167)$$

Если же значения магнитной индукции в расчетных сечениях зубца мало отличаются от 1,8 Тл или же меньше 1,8 Тл, то соответствующее значение напряженности поля определяют по таблицам намагничивания для зубцов без расчета коэффициентов, учитывающих ответвление магнитного потока в паз.

Расчетное значение напряженности поля в зубце статора, А/м,

$$H_{z1} = (H_{z1max} + 4H_{z1ср} + H_{z1max})/6. \qquad (5.168)$$

Магнитное напряжение зубцового слоя статора определяют по (5.156).

Зубцовый слой ротора. При *овальных полузакрытых и закрытых пазах* ротора (см. рис. 5.7, *а*, *б*) зубцы имеют параллельные стенки и магнитная индукция в зубце, Тл,

$$B_{z2} = B_\delta t_2 / k_{c2} b_{z2}. \qquad (5.169)$$

При $B_{z2} \leqslant 1{,}8$ Тл напряженность поля в зубце H_{z2} определяют по таблицам намагничивания для зубцов (см. приложение П.2). При $B_{z2} > 1{,}8$ Тл напряженность поля H_{z2} определяют по кривым намагничивания для зубцов, при этом коэффициент, учитывающий ответвление части магнитного потока в паз,

$$k_{п2} = t_{2(1/3)} / k_{c2} b_{z2}, \qquad (5.170)$$

где

$$t_{2(1/3)} = \pi (D_2 - {}^4/_3 h_{z2}) / Z_2. \qquad (5.171)$$

Магнитное напряжение зубцового слоя ротора при *овальных* пазах, А,

$$F_{z2} = H_{z2} (h_{z2} - 0{,}4 d_{п2}) 10^{-3}, \qquad (5.172)$$

где $d_{п2}$ — диаметр малой окружности по рис. 5.7, *а* и *б*, мм.

Если пазы ротора *бутылочные закрытые* (см. рис. 5.7, *г*), то магнитная индукция в среднем сечении зубца верхней части паза $B_{z2в}$ равна

$$B_{z2в} = B_\delta t_2 / k_{c2} b_{z2в}, \qquad (5.173)$$

где

$$b_{z2в} = \frac{\pi (D_2 - 2h_{м2} - h'_2)}{Z_2} - d'_{п2}. \qquad (5.174)$$

Напряженность поля $H_{z2в}$ определяют по кривым намагничивания для зубцов (см. приложение П.2).

Магнитное напряжение верхней части зубца, А,

$$F_{z2в} = H_{z2в} L_{z2в} 10^{-3}, \qquad (5.175)$$

где

$$L_{z2в} = h'_2 + h_{м2}. \qquad (5.176)$$

Магнитная индукция в нижней части бутылочного паза определяется по (5.173) с заменой $b_{z2в}$ на $b_{z2н}$, мм:

$$b_{z2н} = (\pi / Z_2)(D_2 - 2h_{м2} - 2h'_2 - d_{п2}) - d_{п2}. \qquad (5.177)$$

Если $B_{z2н} \leqslant 1{,}8$ Тл, то напряженность поля определяют по таблицам намагничивания для зубцов (см. приложение П.2).

Магнитное напряжение нижней части зубца, А,

$$F_{z2н} = H_{z2н} L_{z2н} \cdot 10^{-3}, \qquad (5.178)$$

где

$$L_{z2н} = h_2 + 0{,}5\,(d_{п2} + d'_{п2}). \qquad (5.179)$$

Магнитное напряжение зубцового слоя ротора при бутылочном пазе, А,

$$F_{z2} = F_{z2в} + F_{z2н}. \qquad (5.180)$$

Если $B_{z2н} > 1{,}8$ Тл, то $H_{z2н}$ определяют по кривым намагничивания для зубцов (см. приложение П.2).

При этом коэффициент

$$k_{п2(1/2)} = t_{2н(1/2)}/k_{c2}\, b_{z2н}, \qquad (5.181)$$

где $t_{2н(1/2)}$ — шаг по нижней части паза на высоте $^1/_2$ от нижней части зубца (см. рис. 5.7, *г*), мм:

$$t_{2н(1/2)} = (\pi/Z_2)\,(D_2 - 2h_{z2} + h_2). \qquad (5.182)$$

При *прямоугольных полузакрытых* пазах (рис. 5.19, *б*) магнитная индукция в наиболее узком месте зубца, Тл,

$$B_{z2max} = B_\delta\, t_2/k_{c2}\, b_{z2min}. \qquad (5.183)$$

При $B_{z2max} \leqslant 1{,}8$ Тл напряженность поля H_{z2} определяют по магнитной индукции на $^1/_3$ высоты зубца, считая от его наиболее узкого места, Тл:

$$B_{z2(1/3)} = B_\delta\, t_2/b_{z2(1/3)}\, k_{c2}, \qquad (5.184)$$

где $b_{z2(1/3)}$ — ширина зубца в расчетном сечении, мм:

$$b_{z2(1/3)} = \pi/Z_2\,[D_2 - (4/3)\,h_{z2}] - b_{п2}. \qquad (5.185)$$

Напряженность поля определяют по таблицам намагничивания для зубцов (см. приложение П.2).

Магнитное напряжение зубцового слоя ротора, А,

$$F_{z2} = H_{z2}\, h_{z2} \cdot 10^{-3}. \qquad (5.186)$$

Если же $B_{z2max} > 1{,}8$ Тл, то напряженность поля находят в трех расчетных сечениях зубца — минимальном, среднем и максимальном, а затем определяют расчетное значение напряженности поля в зубце ротора, А/м,

$$H_{z2} = (H_{z2max} + 4H_{z2ср} + H_{z2min})/6. \qquad (5.187)$$

Порядок определения слагаемых выражения (5.187) аналогичен расчету H_{z1} при $B_{z1max} > 1{,}8$ Тл для прямоугольных пазов статора с учетом рис. 5.19, *б*.

Используя полученные значения МДС воздушного зазора F_δ и зубцовых слоев статора F_{z1} и ротора F_{z2}, определяют коэффициент магнитного насыщения зубцов двигателя

$$k_{\mu z} = (F_\delta + F_{z1} + F_{z2})/F_\delta\,. \qquad (5.188)$$

Спинка статора. Магнитная индукция в спинке статора, Тл,

$$B_{c1} = 0{,}5\alpha_i \tau B_\delta\,/k_{c1}\, h_{c1}. \qquad (5.189)$$

Напряженность магнитного поля H_{c1} определяют следующим образом [1]: при $2p \geqslant 4$, а также при $2p = 2$ и $B_{c1} \leqslant 1{,}4$ Тл для определения H_{c1} пользуются таблицами намагничивания для спинки машин переменного тока; при $2p = 2$ и $B_{c1} > 1{,}4$ Тл для определения H_{c1} пользуются основными таблицами намагничивания (см. приложение П.2), при этом расчетное значение B_{c1} по (5.189) уменьшают на 0,4 Тл.

Магнитное напряжение спинки статора, А.

$$F_{c1} = H_{c1}\, L_{c1} \cdot 10^{-3}, \qquad (5.190)$$

где L_{c1} — длина средней силовой линии в спинке статора, мм:

$$L_{c1} = (\pi/2p)\,(D_{1н} - h_{c1}). \qquad (5.191)$$

Спинка ротора. Магнитную индукцию в спинке ротора B_{c2} определяют по (5.189) с заменой h_{c1} на h_{c2} и k_{c1} на k_{c2}. Напряженность поля H_{c2} определяют следующим образом: при $2p = 2$ — по основным таблицам намагничивания соответствующей марки электротехнической стали, а при $2p \geqslant 4$ — по таблицам намагничивания для спинки сердечника машин переменного тока (см. приложение П.2).

Магнитное напряжение спинки ротора, А,

$$F_{c2} = H_{c2}\, L_{c2} \cdot 10^{-3}, \qquad (5.192)$$

где L_{c2} — длина средней силовой линии в спинке ротора, мм:

$$L_{c2} = [(\pi/2p)\,(D_2 - 2h_{z2} - h_{c2})] + h_{c2}. \qquad (5.193)$$

При наличии в сердечнике ротора аксиальных вентиляционных каналов диаметром d_{k2} длину средней силовой линии принимают равной, мм,

$$L'_{c2} = L_{c2} + 1{,}3d_{к2}. \qquad (5.194)$$

Намагничивающий ток. Коэффициент насыщения магнитной цепи двигателя

$$k_\mu = \Sigma F/2F_\delta\,, \qquad (5.195)$$

где ΣF — МДС на пару полюсов, А (5.151).

Намагничивающий ток, А,

$$I_\mu = p\Sigma F/0{,}9m_1\, w_1\, k_{об1}; \qquad (5.196)$$

в процентах номинального тока

$$I_{\mu\%} = I_\mu \cdot 100/I_{1ном}. \qquad (5.197)$$

Коэффициент магнитного рассеяния обмотки статора

$$\sigma_\mu = x_1/x_m; \qquad (5.198)$$

здесь x_1 — индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора (5.79); x_m — главное индуктивное сопротивление обмотки статора, соответствующее основной гармонике, Ом:

$$x_m = k_E U_1 / I_\mu, \quad (5.199)$$

или в относительных единицах

$$x_{m*} = x_m I_{1\text{ном}} / U_1. \quad (5.200)$$

Если $k_\mu \geqslant 1{,}7$ и при этом $\sigma_\mu \geqslant 0{,}05$, то определяют ЭДС холостого хода, В,

$$E_0 = U_1 / (1 + \sigma_\mu). \quad (5.201)$$

Если отличие E_0 от $E = k_E U_1$ превышает 5 %, то расчет магнитной цепи следует повторить при значении магнитной индукции в зазоре B_δ, измененной пропорционально отношению E_0/E.

Глава шестая

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК И УПРОЩЕННЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

6.1. ПОТЕРИ И КПД АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В процессе преобразования энергии в электрической машине возникают потери мощности, т. е. часть мощности, поступающей в машину, рассеивается в ней, преобразуясь в теплоту. По этой причине мощность на выходе машины P_2 меньше подводимой мощности P_1 на потери ΣP:

$$P_2 = P_1 - \Sigma P.$$

Потери в электрической машине разделяются на основные и добавочные.

Основные потери — это потери, связанные с основными электромагнитными и механическими процессами, происходящими в электрической машине. Основные потери разделяются на магнитные, электрические и механические.

Основные магнитные потери в асинхронном двигателе — это потери в ферромагнитных участках магнитной цепи в процессе их перемагничивания основным магнитным потоком. Эти потери складываются из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи в спинке и зубцовом слое сердечника статора. Основные магнитные потери в сердечнике ротора в практических расчетах не учитываются из-за их малого значения, обусловленного малой частотой перемагничивания ротора $f_2 = f_1 s$, где s — скольжение. В режиме номинальной нагрузки асинхронных двигателей общего назначения скольжение $s_{\text{ном}} = 1 \div 6$ %, что соответствует частоте перемагничивания сердечника ротора $f_2 = 0{,}5 \div 3$ Гц.

Основные магнитные потери в спинке статора, Вт,

$$P_{\text{м,с1}} = k_{\text{м,т}} P_{1{,}0/50} (f_1/50)^\beta B_{\text{с1}}^2 G_{\text{с1}}; \quad (6.1)$$

основные магнитные потери в зубцовом слое статора, Вт,

$$P_{\text{м}z1} = k_{\text{м,т}} P_{1{,}0/50} (f_1/50)^\beta B_{z1}^2 G_{z1}, \quad (6.2)$$

где $k_{\text{м,т}} = 1{,}7$ — технологический коэффициент, учитывающий увеличение магнитных потерь из-за наличия в сердечнике статора дефектов, возникающих при штамповке листов, их сборке и последующей обработке пакетов (наклепы по краям пластин, заусенцы и т. п.); β — показатель степени, зависящий от марки стали; $P_{1{,}0/50}$ — удельные магнитные потери, т. е. потери, происходящие в 1 кг стали при перемагничивании с частотой 50 Гц в магнитном поле с индукцией 1,0 Тл. Ниже приведены значения показателя степени β и удельных потерь $P_{1{,}0/50}$ для некоторых марок электротехнической стали:

Марка стали	β	$P_{1{,}0/50}$, Вт/кг
2013	1,5	2,50
2211	1,5	2,6
2312	1,4	1,75
2411	1,3	1,60

Магнитные индукции в спинке статора $B_{\text{с1}}$ и в зубцовом слое статора B_{z1} принимаются из расчета магнитной цепи. При этом если зубцы статора имеют параллельные стенки, то $B_{z1} = B_{z1(1/3)}$.

Расчетные массы стали, кг, спинки статора $G_{\text{с1}}$ и зубцового слоя G_{z1} определяются по формулам

$$G_{\text{с1}} = 7{,}8 \cdot 10^{-6} l_i k_{\text{с1}} h_{\text{с1}} \pi (D_{1\text{н}} - h_{\text{с1}}); \quad (6.3)$$

$$G_{z1} = 7{,}8 \cdot 10^{-6} l_i k_{\text{с1}} [h_{z1} \pi (D_1 + h_{z1}) - S_{\text{п1}} Z_1], \quad (6.4)$$

где $S_{\text{п1}}$ — площадь паза, мм² (5.19).

При частоте переменного тока $f_1 = 50$ Гц формулы для расчета основных магнитных потерь в спинке и в зубцовом слое статора, Вт, имеют вид

$$P_{\text{м,с1}} = k_{\text{м,т}} P_{1{,}0/50} B_{\text{с1}}^2 G_{\text{с1}}; \quad (6.5)$$

$$P_{\text{м}z1} = k_{\text{м,т}} P_{1{,}0/50} B_{z1}^2 G_{z1}. \quad (6.6)$$

Основные магнитные потери в асинхронном двигателе, Вт,

$$P_{\text{м}} = P_{\text{м,с1}} + P_{\text{м}z1}. \quad (6.7)$$

Основные электрические потери — это потери на нагрев обмоток статора и ротора проходящими по этим обмоткам токами. Основные электрические потери в обмотке статора, Вт,

$$P_{\text{э1}} = m_1 I_1^2 r_1; \quad (6.8)$$

основные электрические потери в обмотке ротора, Вт,

$$P_{\text{э2}} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2', \quad (6.9)$$

где r_1 и r_2' — активные сопротивления фазных обмоток статора и ротора, приведенные к расчетной рабочей температуре, соответст-

вующей классу нагревостойкости системы изоляции, примененной в двигателе, Ом.

Для расчета электрических потерь в обмотке ротора можно также воспользоваться выражением, Вт,

$$P_{э2} = sP_{эм}, \quad (6.10)$$

где $P_{эм}$ — электромагнитная мощность асинхронного двигателя, Вт:

$$P_{эм} = P_1 - P_м - P_{э1}; \quad (6.11)$$

P_1 — мощность, подводимая к двигателю из сети, Вт:

$$P_1 = m_1 I_1 U_{1ном} \cos\varphi_1. \quad (6.12)$$

В двигателях с фазным ротором имеют место еще и электрические потери в переходном щеточном контакте фазного ротора, Вт:

$$P_{э.щ} = 3I_2 \Delta U_щ/2, \quad (6.12а)$$

где $\Delta U_щ$ — переходное падение напряжения на пару щеток, В (см. табл. 2.3).

Основные механические потери в асинхронном двигателе — это потери на трение в подшипниках и на вентиляцию; для асинхронных двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 их можно определить по формуле

$$P_{мех} = k_т (n_1 \cdot 10^{-3})^2 (D_{1н} \cdot 10^{-2})^4, \quad (6.13)$$

где

$$\left.\begin{aligned} k_т &= 1{,}3\,(1 - D_{1н} \cdot 10^{-3}) \text{ при } 2p = 2; \\ k_т &= 1 \text{ при } 2p > 2. \end{aligned}\right\} \quad (6.14)$$

Основные механические потери двигателей со степенью защиты IP23 и способом охлаждения IC01 без радиальных вентиляционных каналов с вентиляционными лопатками на короткозамыкающих кольцах

$$P_{мех} = k_т (n_1 \cdot 10^{-3})^2 (D_1 \cdot 10^{-3})^4 \cdot 10^3. \quad (6.15)$$

Значение коэффициента $k_т$ принимается в зависимости от внутреннего диаметра сердечника статора D_1: для двигателей с $2p=2$ $k_т=6$ при $D_1>250$ мм и $k_т=5$ при $D_1\leqslant250$ мм; для двигателей с $2p>2$ $k_т=7$ при $D_1>250$ мм и $k_т=6$ при $D_1\leqslant250$ мм.

В асинхронных двигателях с фазным ротором механические потери обусловлены еще и трением щеток о контактные кольца, Вт,

$$P_{мех.щ} = k_{т.щ} F_щ S_щ v_{к.к} \cdot 10^{-6}, \quad (6.16)$$

где $k_{т.щ}$ — коэффициент трения щеток: $k_{т.щ}=0{,}15\div0{,}17$; $F_щ$ — давление щеток, Па, принимают по табл. 2.2 в зависимости от марки щеток; $S_щ$ — общая площадь контактной поверхности всех щеток, мм²:

$$S_щ = 3I_2/\Delta_щ; \quad (6.17)$$

I_2 — ток ротора, определяется по (5.81); $\Delta_щ$ — допустимая плотность тока, А/мм², определяется по табл. 2.2; $v_{к.к}$ — окружная скорость контактных колец, м/с:

$$v_{к.к} = \pi d_{к.к} n_1 \cdot 10^{-3}/60; \quad (6.18)$$

$d_{к.к}$ — диаметр контактного кольца, предварительно можно принять $d_{к.к}=(0{,}40\div0{,}45)D_1$, мм.

Значение окружной скорости контактных колец, рассчитанное по (6.18), не должно превышать допустимого значения по табл. 2.2.

Добавочные потери — это потери, возникающие из-за высших гармоник МДС обмоток, потока рассеяния обмоток, пульсации магнитного поля в воздушном зазоре, вытеснения тока в проводниках и других неосновных электромагнитных процессов в электрической машине. Добавочные потери асинхронных двигателей в соответствии с ГОСТ 11828-75 принимают равными 0,5 % потребляемой двигателем мощности P_1 в номинальном режиме, Вт,

$$P_{доб} = 0{,}005 P_1 \cdot 10^3/\eta'_{ном}, \quad (6.19)$$

где $\eta'_{ном}$ — предварительное значение КПД двигателя по рис. 5.1.

В асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором, особенно при скошенных пазах, возникают «поперечные» токи между стержнями короткозамкнутой клетки вследствие замыкания этих стержней листами сердечника. В таких двигателях добавочные потери могут достигать 1—2 % и более подводимой к двигателю мощности. Поэтому в некоторых методиках по расчету таких двигателей имеются указания по уточненному расчету добавочных потерь.

При расчете добавочных потерь для неноминального режима работы двигателя следует воспользоваться выражением

$$P'_{доб} = P_{доб} (I_1/I_{1ном})^2 = P_{доб} I^2_{1*}; \quad (6.20)$$

с некоторым приближением эти потери можно определить по формуле

$$P'_{доб} \approx P_{доб} (P_2/P_{ном})^2 = P_{доб} P^2_{2*}. \quad (6.20а)$$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя

$$\eta = P_2/P_1 = 1 - \Sigma P/P_1, \quad (6.21)$$

где ΣP — суммарные потери в двигателе, кВт:

$$\Sigma P = (P_м + P_{э1} + P_{э2} + P_{мех} + P_{доб}) \cdot 10^{-3}; \quad (6.22)$$

P_1 — подводимая к двигателю мощность, кВт:

$$P_1 = P_2 + \Sigma P. \quad (6.23)$$

6.2. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Асинхронный двигатель в процессе эксплуатации может работать в диапазоне нагрузок от холостого хода до номинальной. При этом его основные параметры — потребляемые ток и мощность, частота вращения, КПД, коэффициент мощности, скольжение и др. — находятся в определенной зависимости от нагрузки на валу двигателя. Графически выраженные зависимости подводимой мощности P_1, тока в цепи статора I_1, электромагнитного момента M, частоты вращения n_2, КПД и коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ от полезной мощности двигателя P_2 называют *рабочими характеристиками асинхронного двигателя.*

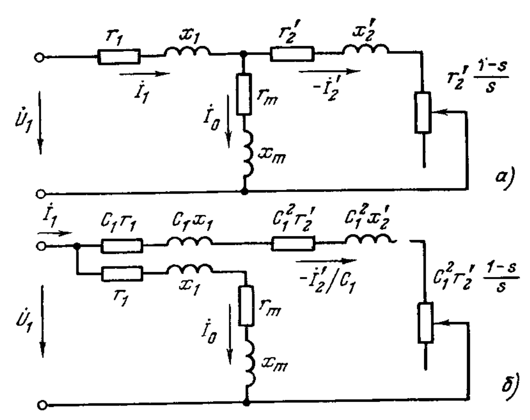


Рис. 6.1. Схемы замещения ансинхронного двигателя

Существует два метода расчета рабочих характеристик: графический (по круговой диаграмме) и аналитический. В основу каждого из этих методов положена схема замещения (рис. 6.1, *а*). Более удобной для практического использования является схема замещения рис. 6.1, *б*. Однако расчет параметров этой преобразованной схемы замещения требует определения коэффициента c_1. Для двигателей мощностью более 1 кВт коэффициент c_1 с достаточной точностью можно определить по формуле

$$c_1 \approx 1 + (x_1/x_m). \tag{6.24}$$

Сопротивления схемы замещения двигателя r_1, x_1, r'_2, x'_2 и x_m рассчитывают по формулам, приведенным в § 5.3—5.6. Активное сопротивление ветви намагничивания схемы замещения с некоторым приближением можно определить по формуле, Ом,

$$r_m \approx P_м/m_1 I_\mu^2, \tag{6.25}$$

где $P_м$ — основные магнитные потери (6.7), Вт; I_μ — намагничивающий ток статора (5.196), А.

Используя схему замещения асинхронного двигателя для расчета рабочих характеристик, исходят из предположения, что параметры схемы замещения при изменениях нагрузки двигателя остаются неизменными. Однако анализ работы асинхронного двигателя показывает, что с ростом тока в обмотках двигателя увеличивается насыщение зубцового слоя от магнитных полей рассеяния. Кроме того, при больших скольжениях следует учитывать

эффект вытеснения тока в стержнях обмотки ротора. В итоге рост нагрузки двигателя сопровождается некоторым уменьшением индуктивного сопротивления и увеличением активного сопротивления ротора.

Опыт показывает, что для асинхронных двигателей общего назначения с некоторым допущением можно принять параметры схемы замещения неизменными в диапазоне нагрузок, соответствующих скольжению $s \approx 0 \div s_{кр}$, где $s_{кр}$ — критическое скольжение, т. е. пока электромагнитный момент двигателя не достигнет максимального значения. При $s > s_{кр}$ влияние перечисленных факторов на параметры схемы замещения столь значительны, что это требует их пересчета.

6.3. ПОСТРОЕНИЕ УПРОЩЕННОЙ КРУГОВОЙ ДИАГРАММЫ

Для построения упрощенной круговой диаграммы асинхронного двигателя необходимо определить следующие величины:

электрические потери в обмотке статора в режиме холостого хода, Вт,

$$P_{э10} = m_1 I_0'^2 r_1, \tag{6.26}$$

где I'_0 — предварительное значение тока идеального холостого хода, А, т. е. тока холостого хода, соответствующего синхронной частоте вращения ротора двигателя; с некоторым приближением его можно принять равным намагничивающему току статора:

$$I'_0 \approx I_\mu; \tag{6.27}$$

потери в режиме холостого хода, Вт,

$$P_0 = P_{э10} + P_м + P_{мех}; \tag{6.28}$$

активную составляющую тока холостого хода, А,

$$I_{0а} = P_0/m_1 U_{1ном}; \tag{6.29}$$

ток холостого хода, А,

$$I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_{0a}^2}; \tag{6.30}$$

коэффициент мощности в режиме холостого хода

$$\cos\varphi_0 = I_{0а}/I_0. \tag{6.31}$$

Индуктивное и активное сопротивления короткого замыкания, Ом, соответствующие параметрам схемы замещения при работе двигателя со скольжением $s \leqslant s_{кр}$,

$$x'_к = c_1 x_1 + c_1^2 x'_2; \quad r'_к = c_1 r_1 + c_1^2 r'_2. \tag{6.32}$$

Круговую диаграмму строим в следующем порядке (рис. 6.2). Проведя оси координат, отложим вектор напряжения $U_{1ном}$. Затем, выбрав масштаб тока m_i (А/мм), проведем вектор тока I_0 (отре-

зок OH) под углом φ_0 к оси ординат. Затем из точки H — точки холостого хода ($s=0$) — начертим прямую, параллельную оси абсцисс, на которой отложим отрезок HC, представляющий собой диаметр окружности тока, мм,

$$D_i = (U_{1ном}/x'_к)/m_i. \quad (6.33)$$

Для получения необходимой точности при определении рабочих характеристик по круговой диаграмме следует принять масштаб

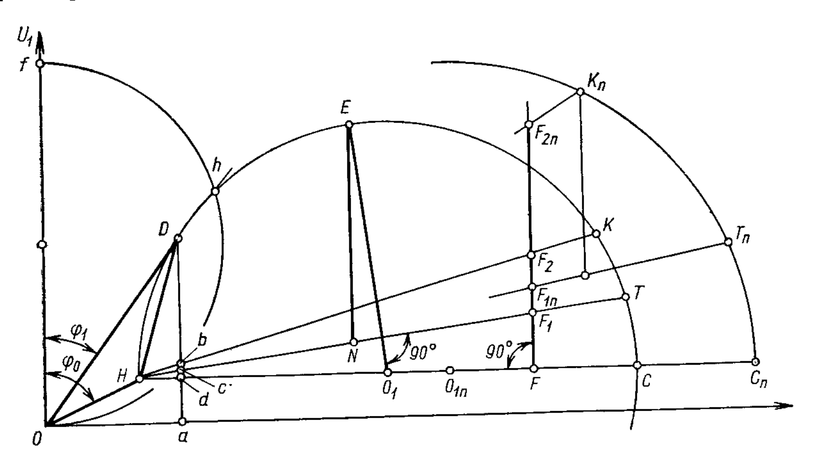


Рис. 6.2. Упрощенная круговая диаграмма трехфазного асинхронного двигателя

тока m_i таким, чтобы диаметр окружности тока D_i был не менее 200 мм, при этом все построения следует вести остро отточенным карандашом.

Разделив отрезок HC на две равные части, получим точку O_1 — центр окружности токов, из которой радиусом $D_i/2$ проведем полуокружность тока.

На прямой O_1C (точка F) восставим перпендикуляр, на котором отложим отрезки, мм,

$$FF_1 = r'_1 HF/x'_к; \quad FF_2 = r'_к HF/x'_к. \quad (6.34)$$

Из точки H через точки F_1 и F_2 проведем прямые до пересечения с окружностью тока в точках T и K. Точка T соответствует скольжению $s=\pm\infty$, а прямая HT является *линией электромагнитной мощности* (момента). Точка K — точка короткого замыкания — соответствует скольжению $s=1$, а прямая HK является *линией полезной мощности.* Построенная круговая диаграмма может быть использована для нахождения параметров, необходимых для получения рабочих характеристик асинхронного двигателя при нагрузках, соответствующих скольжению $s<s_{кр}$. Точка E на окружности токов соответствует максимальному моменту двигателя. Положение этой точки определим следующим образом: из точки O_1 опустим перпендикуляр на линию электромагнитной мощности

HT и продолжим его до пересечения с окружностью токов в точке E. Таким образом, рассматриваемая круговая диаграмма может быть использована для получения параметров рабочих характеристик лишь на участке HE окружности токов.

Рассмотрим порядок определения параметров асинхронного двигателя для режима его работы, определяемого точкой D на окружности токов (рис. 6.2).

Токи. Соединив точку D с точками H и O, получим треугольник токов ODH, стороны которого определяют: ток статора $I_1 = ODm_i$, ток холостого хода $I_0 = OHm_i$ и ток ротора $I'_2/c_1 = HDm_i$.

Опустив перпендикуляр из точки D на ось абсцисс Da, получим прямоугольный треугольник ODa, катеты которого определяют активную $I_{1a} = Dam_i$ и реактивную $I_{1р} = Oam_i$ составляющие тока статора.

Подводимая мощность P_1. Известно, что подводимая к двигателю мощность $P_1 = m_1 U_{1ном} I_1 \cos\varphi_1$, но так как $U_{1ном} = \text{const}$, а $I_1 \cos\varphi_1 = I_{1a}$, то мощность P_1 прямо пропорциональна активной составляющей тока статора. Следовательно, подводимую к двигателю активную мощность можно определить по формуле

$$P_1 = Dam_P, \quad (6.35)$$

где $m_P = m_1 U_{1ном} m_i \cdot 10^{-3}$ — масштаб мощности, кВт/мм.

Подводимую мощность отсчитывают от оси абсцисс, которую называют *линией подводимой мощности,* до заданной точки на окружности токов.

Полезная мощность P_2. Полезную мощность на круговой диаграмме отсчитывают по вертикали от точки D на окружности токов до линии полезной мощности HK. Для заданной точки на окружности токов

$$P_2 = m_P Db. \quad (6.36)$$

Электромагнитная мощность и электромагнитный момент. Для заданной точки D на окружности тока электромагнитная мощность

$$P_{эм} = m_P Dc. \quad (6.37)$$

Электромагнитный момент двигателя

$$M = P_{эм}/\omega_1 = 30P_{эм}/\pi n_1 = 30 m_P Dc/\pi n_1,$$

или

$$M = m_M Dc, \quad (6.38)$$

где m_M — масштаб моментов, Н·м/мм:

$$m_M = 30 m_1 U_{1ном} m_i/\pi n_1. \quad (6.39)$$

Коэффициент мощности. Для определения коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ на оси ординат строим полуокружность произвольного диаметра. Тогда для заданной точки D на окружности токов получим $\cos\varphi_1 = Oh/Of$.

Для удобства расчетов целесообразно диаметр полуокружности Of принять равным 100 мм. В этом случае $\cos\varphi_1 = Oh/100$.

Коэффициент полезного действия. Известно, что $\eta = P_2/P_1$. На круговой диаграмме $P_2 = Dbm_P$; $P_1 = Dam_P$, тогда

$$\eta = Db/Da. \tag{6.40}$$

Расчет КПД указанным способом дает некоторую погрешность, так как при этом учитываются не все виды потерь, в частности не учитываются добавочные потери. Ошибка тем больше, чем выше КПД. Так, при $\eta_{ном} > 0{,}8$ ошибка становится недопустимой. Поэтому КПД асинхронных двигателей следует определять, пользуясь выражением (6.21).

Перегрузочная способность двигателя. Отрезок EN в масштабе моментов определяет максимальный момент двигателя, Н·м,

$$M_{max} = m_i\,EN. \tag{6.41}$$

Если точка D на окружности токов соответствует номинальному режиму работы, то перегрузочная способность двигателя определится отношением отрезков:

$$M_{max}/M_{ном} = EN/Dc. \tag{6.42}$$

Перегрузочная способность асинхронных двигателей общего назначения равна 1,7—2,4.

Скольжение. Рассчитав электрические потери в обмотке ротора, Вт,

$$P_{э2} = m_1 I_2'^2 r_2', \tag{6.43}$$

где I_2' определяется по круговой диаграмме, А:

$$I_2' = m_i HD/c_1, \tag{6.44}$$

найдем скольжение двигателя

$$s = P_{э2}/P_{эм}, \tag{6.45}$$

где электромагнитную мощность $P_{эм}$ определяют по (6.37).

6.4. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимости тока статора I_1, потребляемой мощности P_1, скольжения s, частоты вращения n_2, КПД и коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ от полезной мощности двигателя P_2.

Для получения требуемых параметров посредством круговой диаграммы задаются рядом значений тока статора, например $0{,}5\,I_{1ном}$; $0{,}75\,I_{1ном}$; $I_{1ном}$; $1{,}25\,I_{1ном}$, где $I_{1ном}$ — номинальный ток статора (5.47).

Используя масштаб тока m_i, определяют отрезки для указанных значений токов, мм:

$$OD_{0,5} = m_i \cdot 0{,}5I_{1ном};$$
$$OD_{0,75} = m_i \cdot 0{,}75I_{1ном};$$
$$OD_{1,0} = m_i \cdot I_{1ном};$$
$$OD_{1,25} = m_i \cdot 1{,}25I_{1ном}.$$

Отложив эти отрезки из точки O до пересечения с окружностью токов, получают точки $D_{0,5}$; $D_{0,75}$; $D_{1,0}$ и $D_{1,25}$.

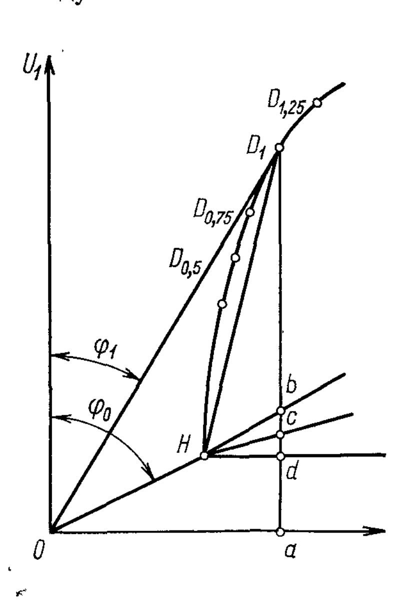
Пользуясь указаниями § 6.3, для каждой из этих точек определяют требуемые параметры, заносят их в табл. 6.1, а затем строят рабочие характеристики асинхронного двигателя.

Как уже отмечалось, упрощенная круговая диаграмма может быть практически использована для получения данных, необходимых для построения рабочих характеристик двигателя, лишь на

Таблица 6.1

I_1, А	$I_0 = \ldots$			$I_{1ном} \ldots$	
$I_1/I_{1\,ном}$					
OD, мм					
Oh, мм					
Db, мм					
Dc, мм					
Da, мм					
HD, мм					
$I_2' = m_i HD/c_1$, А					
$P_1 = m_p Da \cdot 10^{-3}$, кВт					
$P_2 = m_p Db \cdot 10^{-3}$, кВт					
$P_{эм} = m_p Dc \cdot 10^{-3}$, кВт					
$M = m_м Dc$, Н·м					
$P_{э2} = m_1 I_2'^2 r_2^1$, Вт					
$s = P_{э2}/P_{эм}$					
$n_2 = n_1(1-s)$, об/мин					
$P_{э1} = m_1 I_1^2 r_1$, Вт					
$P'_{доб} = P_{доб}(I_1/I_{1ном})^2$, Вт					
ΣP, кВт					
$\eta = P_2/(P_2 + \Sigma P)$					
$\cos\varphi_1 = Oh/Of$					

участке HE окружности токов (для режимов работы, соответствующих скольжению $s=0\div s_{кр}$). Но именно этот участок диаграммы даже при больших диаметрах окружности токов является небольшим, а расстояния между линиями полезной, электромагнитной и подведенной мощностей настолько малы, что измерение отрезков между ними связано со значительными погрешностями.



Для устранения этого недостатка при пользовании круговой диаграммой целесообразно, пользуясь принципом подобия, увеличить «рабочую» часть диаграммы в 2—3 раза и построить ее отдельно (рис. 6.3). При этом, увеличив диаметр окружности токов, необходимо углы между векторами и линиями мощностей сохранить неизменными. При пользовании этой «рабочей» частью диаграммы масштаб тока, А/мм, нужно изменить, приняв его равным

$$m_i' = m_i\,(D_i/D_i'),$$

где m_i — масштаб токов на исходной (полной) диаграмме, А/мм; ←

Рис. 6.3. «Рабочий» участок упрощенной круговой диаграммы

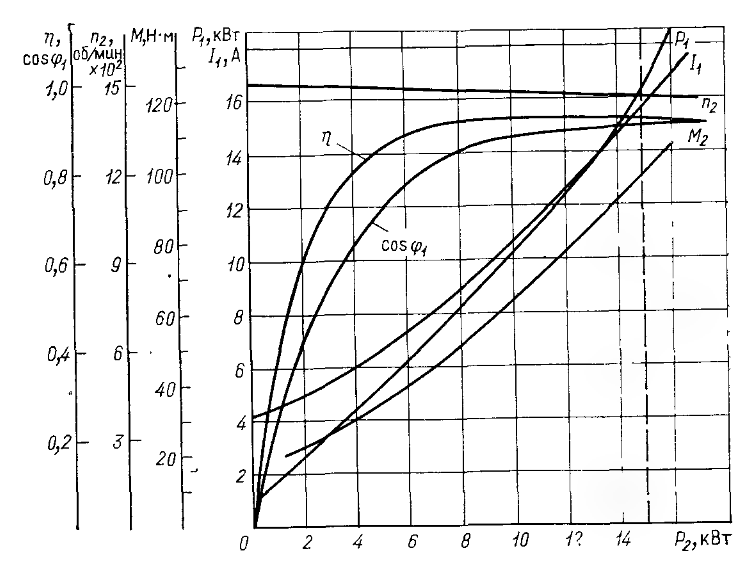


Рис. 6.4. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (15 кВт, 380/660 В, $2p=4$, 50 Гц)

D_i — диаметр окружности токов на исходной (полной) диаграмме, мм; D_i' — диаметр окружности токов на «рабочем» участке диаграммы, мм.

Определение параметров рабочих характеристик с помощью «рабочего» участка диаграммы осуществляют в соответствии с изложенным выше порядком, но с измененными значениями масштабов тока $m_i'=m_i(D_i/D_i')$, мощностей $m_P'=m_1U_{1ном}m_i'$, момента $m_M'=30\;m_1U_{1ном}m_i'/\pi n_1$.

По полученным данным строят рабочие характеристики двигателя (рис. 6.4).

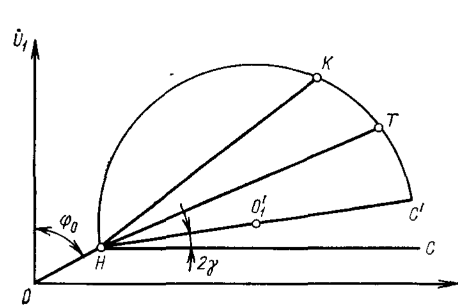


Рис. 6.5. Уточненная круговая диаграмма трехфазного асинхронного двигателя

Погрешности рассмотренной круговой диаграммы, обусловленные некоторым упрощением в расчетах параметров схемы замещения с вынесенным намагничивающим контуром (6.24), обычно заметны лишь в двигателях небольшой мощности ($P\leqslant1$ кВт). Эти погрешности практически устраняются, если центр окружности тока O_1' расположить на линии HC' (рис. 6.5), наклоненной к линии HC под углом 2γ, где

$$\gamma = \arcsin\,(I_0\,r_1/U_{1ном}).$$

6.5. ПУСКОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Активное сопротивление короткого замыкания при пуске двигателя ($s=1$) с учетом явления вытеснения тока, Ом,

$$r_{к,п}' = c_1\,r_1 + c_1^2\,r_{2п}', \tag{6.46}$$

где $r_{2п}'$ — активное сопротивление обмотки ротора, Ом, при пуске двигателя, $r_{2п}'=k_{пр1}(k_{в,т}r_{ст}+r_{кл}'')$ (см. § 5.5).

Для учета влияния магнитного насыщения зубцового слоя индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора представляют состоящими из переменных и постоянных составляющих [1].

Переменные составляющие индуктивных сопротивлений определяются коэффициентами магнитной проводимости рассеяния, которые зависят от насыщения: коэффициентами дифференциального рассеяния статора и ротора и частично коэффициентами пазового рассеяния, связанными с рассеянием клиновой части и шлица пазов статора и ротора, мостиков закрытых пазов ротора.

Постоянные составляющие индуктивных сопротивлений определяются коэффициентами магнитной проводимости, которые не зависят от насыщения: коэффициентами лобового рассеяния обмоток

статора и фазного ротора, коэффициентами рассеяния короткозамыкающих колец и рассеяния скоса пазов ротора, частично коэффициентами пазового рассеяния статора и ротора, связанными с рассеянием части паза, занятого собственно обмоткой или стержнем.

Переменная составляющая коэффициента пазового рассеяния статора, зависящая от насыщения:

паз трапецеидальный полузакрытый (см. рис. 5.6, *а*)

$$\lambda_{п1пер} = \left(\frac{3h_к}{b'_п + 2b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}}\right) k'_\beta; \qquad (6.47)$$

паз прямоугольный полуоткрытый (рис. 5.6, *б*)

$$\lambda_{п1пер} = \left(\frac{3h_{к1}}{b_{п1} + 2b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}}\right) k'_\beta; \qquad (6.48)$$

паз прямоугольный открытый (рис. 5.6, *в*)

$$\lambda_{п1пер} = \frac{h_{к1} + h_{ш1}}{b_{п1}} k'_\beta. \qquad (6.49)$$

Здесь k'_β для двухслойных обмоток с укороченным шагом определяют по рис. 5.13; для однослойных обмоток $k'_\beta = 1$.

Переменная составляющая коэффициента проводимости рассеяния статора

$$\lambda_{1пер} = \lambda_{п1пер} + \lambda_{д1}; \qquad (6.50)$$

где $\lambda_{д1}$ — коэффициент проводимости дифференциального рассеяния (5.72).

Переменная составляющая коэффициента пазового рассеяния ротора, зависящая от насыщения:

паз овальный полузакрытый (см. рис. 5.7, *а*)

$$\lambda_{п2пер} = h_{ш2}/b_{ш2}, \qquad (6.51)$$

паз овальный закрытый (см. рис. 5.7, *б* и *в*)

$$\lambda_{п2пер} = 1{,}12 \cdot 10^3 h_{м2}/I_2, \qquad (6.52)$$

где I_2 — ток в стержне ротора, А, определяется по (5.81);

паз бутылочный закрытый (см. рис. 5.7, *г*)

$$\lambda_{п2в,пер} = 1{,}12 \cdot 10^3 h_{м2}/I_2. \qquad (6.53)$$

Переменная составляющая коэффициента проводимости рассеяния ротора

$$\lambda_{2пер} = \lambda_{п2пер} + \lambda_{д2}, \qquad (6.54)$$

где $\lambda_{д2}$ определяется по (5.105).

Переменная составляющая индуктивного сопротивления рассеяния двигателя, Ом:

пазы короткозамкнутого ротора овальные полузакрытые или закрытые

$$x_{пер} = (c_1 x_1 \lambda_{1пер}/\lambda_1) + (c_1^2 x'_2 \lambda_{2пер}/\lambda_2); \qquad (6.55)$$

пазы короткозамкнутого ротора бутылочные закрытые

$$x_{пер} = (c_1 x_1 \lambda_{1пер}/\lambda_1) + (c_1 x'_0 \lambda_{2пер}/\lambda_{20}); \qquad (6.56)$$

здесь λ_1, λ_2, λ_{20} определяют соответственно по (5.78), (5.109) и (5.120); x_1, x'_2, x'_0 — по (5.79), (5.110а) и (5.123). При расчете λ_2 необходимо учесть коэффициент ψ в (5.104) по кривой $\psi = f(\xi)$ (см. рис. 5.16) для пускового режима ($s=1$).

Постоянная составляющая индуктивного сопротивления рассеяния двигателя, не зависящая от насыщения, Ом:

пазы короткозамкнутого ротора овальные полузакрытые или закрытые

$$x_{пост} = c_1 x_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{1пер}}{\lambda_1} + c_1^2 x'_{2п} \frac{\lambda'_2 - \lambda_{2пер}}{\lambda'_2}; \qquad (6.57)$$

пазы короткозамкнутого ротора бутылочные закрытые

$$x_{пост} = c_1 x_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{1пер}}{\lambda_1} + c_1^2 x'_0 \frac{\lambda_{20} - \lambda_{2пер}}{\lambda_{20}} + c_1^2 x'_н \left(\frac{S_{п2н}}{S_{п2н} + S_{п2в}}\right)^2, \qquad (6.58)$$

где $x'_н$ определяют по (5.121), а $S_{п2н}$ и $S_{п2в}$ — по (5.36) и (5.38).

Индуктивное сопротивление ротора $x'_{2п}$, входящее в (6.55) и (6.57), должно быть рассчитано для пускового режима с учетом вытеснения тока (см. § 5.5). Индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом, для начального пускового режима ($s=1$) с учетом вытеснения тока и магнитного насыщения с некоторым допущением можно принять

$$x'_{к,п} \approx x_{пост} + k_x x_{пер}. \qquad (6.59)$$

При полузакрытых пазах на роторе $k_x = 0{,}0825$, а при закрытых $k_x = 0{,}25$. Более точный расчет $x_{к,п}$ приведен в [1].

На круговой диаграмме (см. рис. 6.2) из точки $O_п$ проводим еще одну полуокружность тока, соответствующую начальному пусковому режиму, диаметром, мм,

$$D_{iп} = \frac{U_{1ном}/x'_{к,п}}{m_i}. \qquad (6.60)$$

На перпендикуляре, восстановленном в точке F, отложим отрезки, мм,

$$FF_{1п} = r_1 HF/x_{к,п}; \qquad (6.61)$$

$$FF_{2п} = r_{к,п} HF/x_{к,п}. \qquad (6.62)$$

Из точки H через точки $F_{1п}$ и $F_{2п}$ проводим прямые $HT_п$ и $HK_п$, являющиеся соответственно линиями электромагнитной мощности (момента) и полезной мощности для пускового режима.

Параметры двигателя по полученной круговой диаграмме определяются следующим образом:

кратность пускового момента

$$M_п/M_{ном} = K_п G/Dc; \qquad (6.63)$$

кратность пускового тока

$$I_{1п}/I_{1ном} = OK_п/OD. \qquad (6.64)$$

Двигатели серии 4А основного исполнения имеют кратность пускового момента: при $h=50 \div 132$ мм $M_п/M_{ном}=2{,}0 \div 2{,}2$; при $h=160 \div 355$ мм $M_п/M_{ном}=1{,}2 \div 1{,}4$.

Кратность пускового тока

$$I_{1п}/I_{1ном} = 4{,}5 \div 7{,}5, \qquad (6.65)$$

при этом бо́льшие значения кратности пускового тока соответствуют двигателям бо́льшей мощности.

6.6. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Рассмотренный графический метод расчета рабочих характеристик по круговой диаграмме, являясь наглядным и удобным для анализа получаемых результатов, имеет недостаток — неизбежную неточность, обусловленную графическими построениями. Аналитический расчет рабочих характеристик не предусматривает каких-либо графических построений. Правда, при этом несколько возрастает объем математических вычислений, но применение вычислительной техники делает незначительным этот недостаток. В основу аналитического метода расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя положена схема замещения с вынесенным намагничивающим контуром (см. рис. 6.1, *б*).

Скольжение при различных нагрузках двигателя определяют по формуле [6]:

$$s \approx \left[A - \sqrt{A^2 - c_1^2 r_2' B}\right]/B; \qquad (6.66)$$

здесь величины A и B являются функциями полной механической мощности двигателя P :

$$A = m_1 U_{1ном}^2/(2P_2') - r_1; \qquad (6.67)$$

$$B = m_1 U_{1ном}/P_2' + R' = 2A + R', \qquad (6.68)$$

где R' — расчетное сопротивление, Ом:

$$R' = r_2'\left\{\left[\frac{r_1}{r_2'}\left(1+\frac{x_2'}{x_m}\right)\right]^2 + \left[\frac{x_1}{r_2'} + \left(1+\frac{x_2'}{x_m}\right) + \frac{x_2'}{r_2'}\right]^2\right\}. \qquad (6.69)$$

Полная механическая мощность, Вт,

$$P_2' = P_2 + P_{доб} + P_{мех} + P_{мех.щ}. \qquad (6.70)$$

Добавочные потери $P_{доб}$ определяют по (6.19) и (6.20), а механические потери $P_{мех}$ и $P_{мех,щ}$ — по (6.13) — (6.16).

Эквивалентное сопротивление рабочей цепи схемы замещения (см. рис. 6.1, *б*), по которой проходит ток $I_2'/c_1 = I_2''$, определяется выражением, Ом,

$$z_{экв} = \sqrt{r_{экв}^2 + x_{экв}^2}, \qquad (6.71)$$

где

$$r_{экв} = c_1 r_1 + c_1^2 r_2'/s; \qquad (6.72)$$

$$x_{экв} = c_1 x_1 + c_1^2 x_2'. \qquad (6.73)$$

Приведенное значение тока в обмотке ротора, А,

$$I_2' = c_1 I_2'', \qquad (6.74)$$

где ток в рабочей цепи схемы замещения

$$I_2'' = U_{1ном}/z_{экв}. \qquad (6.75)$$

Коэффициент мощности в рабочей цепи схемы замещения

$$\cos\varphi_2' = r_{экв}/z_{экв}. \qquad (6.76)$$

Активная составляющая тока I_2'', А,

$$I_{2а}'' = I_2'' \cos\varphi_2'. \qquad (6.77)$$

Реактивная составляющая этого тока, А,

$$I_{2р}'' = I_2'' \sin\varphi_2'. \qquad (6.78)$$

Активная и реактивная составляющие тока статора I_1 определяются выражениями, А,

$$I_{1а} = I_{0а} + I_{2а}''; \qquad (6.79)$$

$$I_{1р} = I_{0р} + I_{2р}'', \qquad (6.80)$$

где $I_{0а}$ и $I_{0р}$ — активная и реактивная составляющие тока идеального холостого хода, А:

$$I_{0а} = (P_{э10} + P_{м})/m_1 U_{1ном}; \qquad (6.81)$$

$$I_{0р} \approx I_{\mu}. \qquad (6.82)$$

Ток статора асинхронного двигателя, А,

$$I_1 = \sqrt{I_{1а}^2 + I_{1р}^2}. \qquad (6.83)$$

Коэффициент мощности асинхронного двигателя

$$\cos\varphi_1 = I_{1а}/I_1. \qquad (6.84)$$

Потребляемая двигателем мощность, кВт,

$$P_1 = m_1 U_{1ном} I_{1а} \cdot 10^{-3}. \qquad (6.85)$$

Частота вращения ротора, об/мин,

$$n_2 = n_1(1 - s). \qquad (6.86)$$

Электромагнитный момент, Н·м,

$$M = 9{,}55P_{\text{эм}} \cdot 10^3/n_2, \tag{6.87}$$

где $P_{\text{эм}}$ — электромагнитная мощность (6.11), кВт.

Для расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя задаются рядом относительных значений полезной мощности $P_* = P_2/P_{\text{ном}}$, например 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,25. Для каждого из этих значений рассчитывают требуемые параметры и заносят их в таблицу, аналогичную табл. 6.3. Затем строят рабочие характеристики двигателя.

Для определения перегрузочной способности асинхронного двигателя можно воспользоваться упрощенным выражением [6], полагающим параметры схемы замещения постоянными:

$$\frac{M_{max}}{M_{\text{ном}}} \approx \frac{(s_{\text{ном}}/s_{\text{кр}}) + (s_{\text{кр}}/s_{\text{ном}}) + R_{\text{кр}}}{2 + R_{\text{кр}}}, \tag{6.88}$$

где $s_{\text{кр}}$ — критическое скольжение:

$$s_{\text{кр}} \approx c_1 r_2'/(x_1 + c_1 x_2'). \tag{6.89}$$

Сопротивление $R_{\text{кр}}$ определяют по формуле

$$R_{\text{кр}} = 2r_1 s_{\text{кр}}/c_1 r_2'. \tag{6.90}$$

При расчете пусковых параметров двигателя следует предварительно определить активное сопротивление короткого замыкания $r'_{\text{к,п}}$ (6.46) и индуктивное сопротивление короткого замыкания $x'_{\text{к,п}}$ (6.59).

Начальный пусковой ток, А,

$$I_{1\text{п}} \approx U_{1\text{ном}} \Big/ \sqrt{r'^2_{\text{к,п}} + x'^2_{\text{к,п}}}. \tag{6.91}$$

Начальный пусковой момент двигателя, Н·м,

$$M_{\text{п}} = \frac{pm_1 U^2_{1\text{ном}} r'_{2\text{п}}}{2\pi f_1 \left(r'^2_{\text{к,п}} + x'^2_{\text{к,п}}\right)}, \tag{6.92}$$

или, используя выражение (6.91), получаем

$$M_{\text{п}} = pm_1 I^2_{1\text{п}} r'_{2\text{п}}/2\pi f_1, \tag{6.92а}$$

где $r'_{2\text{п}}$ — активное сопротивление обмотки ротора в режиме пуска, Ом (см. § 6.5).

Затем определяют кратность пускового момента $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$ и кратность пускового тока $I_{1\text{п}}/I_{1\text{ном}}$.

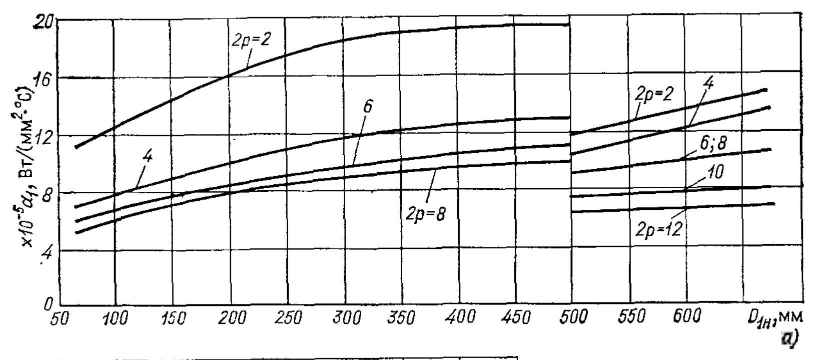
6.7. УПРОЩЕННЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Основу упрощенного теплового расчета асинхронных двигателей составляют положения, изложенные в § 3.2. При этом использованы средние значения различных коэффициентов, характерные для асинхронных двигателей [1].

Обмотка статора. Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя, °С,

$$\Delta\Theta_{\text{пов}1} = k\,\frac{k_\Theta P_{\text{э}1}(2l_1/l_{\text{ср}1}) + P_{\text{м}1}}{\pi D_1 l_1 \alpha_1}, \tag{6.93}$$

где D_1 — внутренний диаметр сердечника статора, мм; α_1 — коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника статора, Вт/(мм²·°С), средние значения этого коэффициента можно опреде-



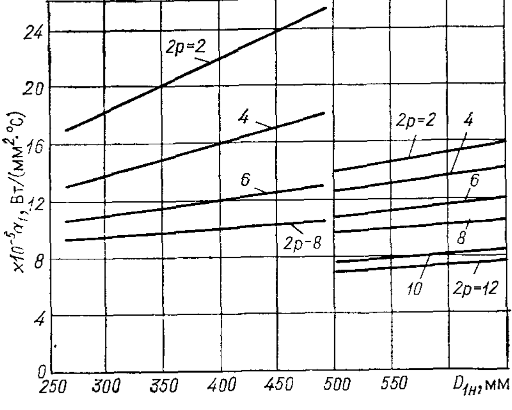


Рис. 6.6. Средние значения коэффициента α_1 для машин переменного тока:
а — степень защиты IP44·
б — степень защиты IP23

лить по рис. 6.6, а, б; k — коэффициент, учитывающий долю потерь в сердечнике статора, передаваемых воздуху внутри двигателя; его значения приведены в табл. 6.2; k_Θ — коэффициент, определяемый отношением значений удельной электрической проводимости меди при расчетной рабочей температуре и при максимальной допустимой температуре; в соответствии с классом нагревостойкости системы изоляции он имеет следующие значения: при классе нагревостойкости системы изоляции B $k_\Theta = 1{,}15$, при F $k_\Theta = 1{,}07$, при H $k_\Theta = 1{,}145$; $P_{\text{э}1}$ — электрические потери в обмотке статора, Вт; $P_{\text{м}1}$ — магнитные потери в сердечнике статора, Вт; $l_{\text{ср}1}$ — средняя длина витка обмотки статора, мм.

Таблица 6.2

Исполнение двигателя по способу защиты	Значения коэффициента k при числе полюсов $2p$					
	2	4	6	8	10	12
IP44	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
IP23	0,84	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора, °C,

$$\Delta\Theta_{из1} = \frac{k_\Theta P_{э1}(2l_1/l_{ср1})}{Z_1 \Pi_1 l_1}\left(\frac{C_{п1}}{\lambda_{экв}} + \frac{b_{п1}+b'_{п1}}{16\lambda'_{экв}}\right), \tag{6.94}$$

где Π_1 — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза статора, мм:

для трапецеидального полузакрытого паза (см. рис. 5.6, *а*)

$$\Pi_1 = 2h_{п1} + b'_{п1} + b_{п1}; \tag{6.95}$$

для прямоугольных полуоткрытых и открытых пазов (см. рис. 5.6, *б* и *в*)

$$\Pi_1 = 2(h_{п1} + b_{п1}); \tag{6.96}$$

$C_{п1}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу статора, мм (см. табл. 5.11—5.14); $\lambda_{экв}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции обмотки в пазу, учитывающий воздушные прослойки: для изоляции классов нагревостойкости B и F среднее значение $\lambda_{экв} = 16 \times 10^{-5}$ Вт/(мм·°C); $\lambda'_{экв}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции провода (рис. 6.7).

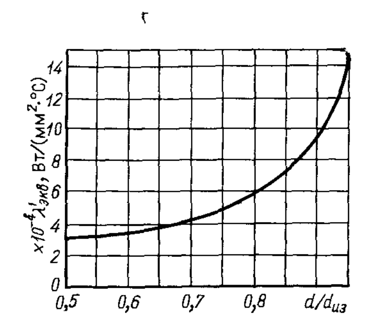


Рис. 6.7. Средние значения $\lambda'_{экв}$

Для обмоток статоров из жестких катушек (см. рис. 5.9) второе слагаемое в скобках формулы (6.94) принимают равным нулю.

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя, °C,

$$\Delta\Theta_{л1} = \frac{kk_\Theta P_{э1}(2l_{л1}/l_{ср1})}{2\pi D_1 l_{в1} \alpha_1}, \tag{6.97}$$

где $l_{л1}$ — средняя длина одной лобовой части катушки, мм (5.61); $l_{ср1}$ — средняя длина витка обмотки статора, мм (5.62); $l_{в1}$ — длина вылета лобовой части обмотки, мм (5.64) и (5.66).

Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки статора, °C,

$$\Delta\Theta_{из.л1} = \frac{k_\Theta P_{э1}(2l_{л1}/l_{ср1})}{2Z_1 \Pi_{л1} l_{л1}}\left(\frac{C_{л1}}{\lambda_{экв}} + \frac{h_{п1}}{12\lambda'_{экв}}\right), \tag{6.98}$$

где $\Pi_{л1}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки обмотки статора, мм:

для трапецеидального полузакрытого паза

$$\Pi_{л1} \approx 2h_{п1} + b_{п1} + b'_{п1}; \tag{6.99}$$

для прямоугольных полуоткрытого и открытого пазов

$$\Pi_{л1} \approx 2(h_{п1} + b_{п1}); \tag{6.100}$$

$C_{л1}$ — односторонняя толщина изоляции лобовой части (мм).

Для статоров с открытыми и полуоткрытыми пазами второе слагаемое в скобках выражения (6.98) принимают равным нулю. Для обмоток, не имеющих изоляции лобовых частей, первое слагаемое в скобках равно нулю.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя, °C,

$$\Delta\Theta'_1 = (\Delta\Theta_{пов1} + \Delta\Theta_{из1})\frac{2l_1}{l_{ср1}} + (\Delta\Theta_{л1} + \Delta\Theta_{из.л1})\frac{2l_{л1}}{l_{ср1}}. \tag{6.101}$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой охлаждающей среды, °C,

$$\Delta\Theta_в = \Sigma P_в / S_{дв}\alpha_в, \tag{6.102}$$

где $\Sigma P_в$ — суммарные потери (за исключением потерь в подшипниках), отводимые в воздух внутри двигателя, Вт:

для двигателей со степенью защиты IP23

$$\Sigma P_в = \Sigma P' - (1-k)(P_{э.л1} + P_м); \tag{6.103}$$

для двигателей со степенью защиты IP44

$$\Sigma P_в = \Sigma P' - (1-k)(P_{э.п1} + P_м) - 0{,}9P_{мех}; \tag{6.104}$$

здесь

$$\Sigma P' = \Sigma P - (k_\Theta - 1)(P_{э1} + P_{э2}); \tag{6.105}$$

$P_{э.л1}$ и $P_{э.п1}$ — электрические потери в лобовых и пазовых частях обмотки статора, Вт:

$$P_{э.л1} = k_\Theta P_{э1} 2l_{л1}/l_{ср1}; \tag{6.106}$$

$$P_{э.п1} = k_\Theta P_{э1} 2l_1/l_{ср1}. \tag{6.107}$$

Условная поверхность охлаждения двигателя, мм²:

для двигателей со степенью защиты IP23

$$S_{дв} = \pi D_{1н}(l_1 + 2l_{в1}); \tag{6.108}$$

для двигателей со степенью защиты IP44 (с охлаждающими ребрами)

$$S_{дв} = (\pi D_{1н} + 8 n_р h_р)(l_1 + 2 l_{в1}), \quad (6.109)$$

где $n_р$ и $h_р$ — число охлаждающих ребер и их высота (см. § 8.2).

Значение коэффициента подогрева воздуха, Вт/(мм²·°С), определяется по графикам $\alpha_в = f(D_{1н})$ рис. 6.8, *а*, *б*.

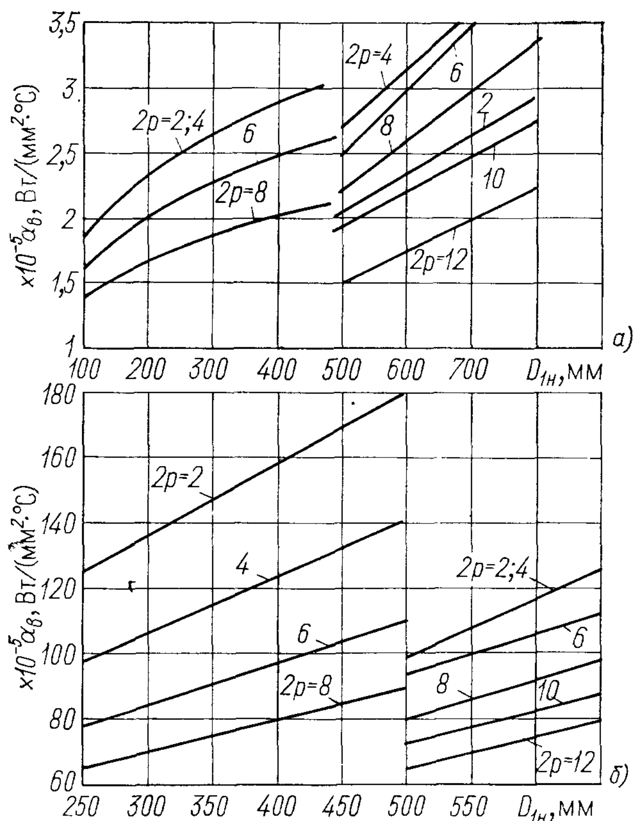


Рис. 6.8. Средние значения коэффициента $\alpha_в$ для машин переменного тока:

а — степень защиты IP44; *б* — степень защиты IP23

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\Theta_1 = \Delta\Theta_1' + \Delta\Theta_в. \quad (6.110)$$

Обмотка фазного ротора. Превышение температуры поверхности сердечника ротора над температурой воздуха внутри двигателя, °С,

$$\Delta\Theta_{пов2} = \frac{k_\Theta P_{э2}(2l_2/l_{ср2})}{\pi D_2 l_2 \alpha_2}, \quad (6.111)$$

где D_2 — наружный диаметр ротора, мм; α_2 — коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника ротора, средние значения которого определяют по рис. 6.9.

Перепад температуры в изоляции пазовой части фазной обмотки ротора, °С,

$$\Delta\Theta_{из2} = \frac{k_\Theta P_{э2}(2l_2/l_{ср2})\, C_{п2}}{Z_2 \Pi_2 l_2 \lambda_{экв}}, \quad (6.112)$$

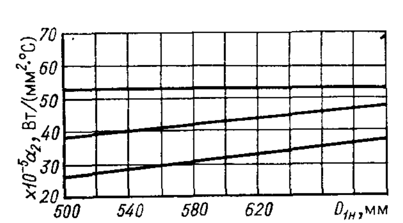
где Π_2 — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза ротора, мм:

$$\Pi_2 = 2(h_{п2} + b_{п2}); \quad (6.113)$$

$C_{п2}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу ротора, мм (см. табл. 5.22, 5.23).

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки ротора над температурой воздуха внутри двигателя, °С,

$$\Delta\Theta_{л2} = \frac{k_\Theta P_{э2}(2l_{л2}/l_{ср2})}{2\pi D_2 l_{в2} \alpha_2}. \quad (6.114)$$



Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки фазного ротора, °С,

$$\Delta\Theta_{из.л2} = \frac{k_\Theta P_{э2}(2l_{л2}/l_{ср2})}{2 Z_2 \Pi_{л2} l_{л2}} \frac{C_{л2}}{\lambda_{экв}}, \quad (6.115)$$

где $\Pi_{л2}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности одной секции в лобовой части, мм

$$\Pi_{л2} = 2(h_{п2} + b_{п2}); \quad (6.116)$$

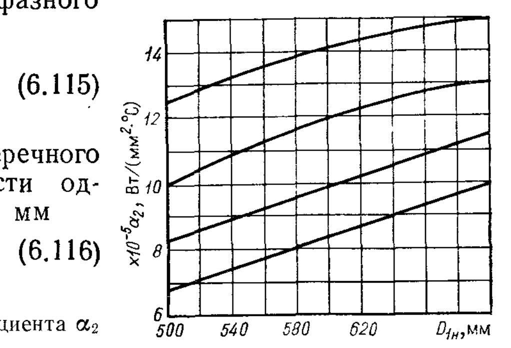


Рис. 6.9. Средние значения коэффициента α_2

$C_{л2}$ — односторонняя толщина изоляции лобовой части обмотки ротора, мм (см. табл. 5.22, 5.23).

Среднее превышение температуры обмотки ротора над температурой воздуха внутри двигателя, °С,

$$\Delta\Theta_2' = (\Delta\Theta_{пов2} + \Delta\Theta_{из2})\frac{2l_2}{l_{ср2}} + (\Delta\Theta_{л2} + \Delta\Theta_{из.л2})\frac{2l_{л2}}{l_{ср2}}. \quad (6.117)$$

Среднее превышение температуры обмотки фазного ротора над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\Theta_2 = \Delta\Theta_2' + \Delta\Theta_в, \quad (6.118)$$

где $\Delta\Theta_в$ определяется по (6.102).

6.8. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Задание. Рассчитать трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором на базе серии 4А.

Исходные данные:

номинальная мощность $P_{ном}=15$ кВт;

частота тока в сети $f_1=50$ Гц;

число полюсов $2p=4$;

высота оси вращения $h=160$ мм;

номинальное напряжение сети $U_{1ном}=380/660$ В;

перегрузочная способность $M_{max}/M_{ном}=2$;

отношение начального пускового момента к номинальному $M_п/M_{ном}$ — не менее 1,3;

отношение начального пускового тока к номинальному $I_{1п}/I_{1ном}$ — не более 7,0;

исполнение двигателя по степени защиты IP44;

способ охлаждения IC0141;

режим работы — продолжительный;

класс нагревостойкости изоляции — F.

1. Главные размеры двигателя (см. § 5.2)

1.1. Наружный и внутренний диаметры сердечника статора.

По табл. 5.1 при $h=160$ мм, $2p=4$, и исполнении по способу защиты IP44 принимаем $D_{1н}=272$ мм, $D_1=185$ мм.

1.2. Предварительные значения КПД (см. рис. 5.1) и коэффициента мощности (см. рис. 5.1)

$$\eta'=0{,}89; \quad \cos\varphi_1'=0{,}89.$$

1.3. Расчетная мощность (5.2)

$$P_i=P_{ном}k_E/\eta'\cos\varphi_1'=15\cdot0{,}96\cdot0{,}89\cdot0{,}89=18{,}2 \text{ кВ}\cdot\text{А},$$

где $k_E=0{,}96$.

1.4. Предварительные значения максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки (см. рис. 5.2) при $D_{1н}=272$ мм принимаем $B_\delta'=0{,}77$ Тл; $A_1'=300\cdot10^2$ А/м.

1.5. Предварительное значение обмоточного коэффициента: принимаем обмотку статора однослойной (табл. 5.9), тогда $k_{об1}'=0{,}96$.

1.6. Расчетная длина сердечника статора (5.4)

$$l_i=\frac{8{,}66\cdot10^{12}P_i}{k_{об1}'n_1D_1^2B_\delta'A_1'}=\frac{8{,}66\cdot10^{12}\cdot18{,}2}{0{,}96\cdot1500\cdot185^2\cdot0{,}77\cdot300\cdot10^2}=138{,}4 \text{ мм},$$

принимаем $l_i=140$ мм.

1.7. Коэффициент длины (5.5)

$$\lambda=l_i/D_1=140/185=0{,}756,$$

что укладывается в диапазон рекомендуемых значений λ.

2. Размеры активной части двигателя (см. § 5.3)

2.1. Воздушный зазор (см. рис. 5.5) при $h=160$ мм принимаем $\delta=0{,}5$ мм.

2.2. Наружный диаметр сердечника ротора (5.6)

$$D_2=D_1-2\delta=185-2\cdot0{,}5=184 \text{ мм}.$$

2.3. Внутренний диаметр сердечника ротора (5.7)

$$D_{2вн}=0{,}33D_2=0{,}33\cdot184=60{,}7 \text{ мм},$$

принимаем $D_{2вн}=60$ мм.

2.4. Конструктивная длина сердечника статора

$$l_1=l_i=140 \text{ мм}.$$

2.5. Число пазов на статоре и роторе (табл. 5.8)

$$Z_1=48; \quad Z_2=38.$$

На роторе применяем скос пазов на одно зубцовое деление статора.

2.6. Форма пазов на статоре (см. табл. 5.9): трапецеидальные полузакрытые (см. рис. 5.6, *а*).

Форма пазов на роторе (см. табл. 5.10): овальные закрытые (см. рис. 5 7, *б*).

2.7. Размеры полузакрытого паза статора:

зубцовое деление статора (5.10)

$$t_1=\pi D_1/Z_1=\pi\cdot185/48=12 \text{ мм}.$$

Ширина зубца статора (5.9)

$$b_{z1}=t_1B_\delta'/k_{c1}B_{z1max}=12\cdot0{,}77/0{,}95\cdot1{,}95=4{,}98 \text{ мм},$$

где $B_{z1max}=1{,}95$ Тл по табл. 5.9;

высота спинки статора (5.12)

$$h_{c1}=0{,}5\alpha_i\tau B_\delta'/k_{c1}B_{c1}=0{,}5\cdot0{,}64\cdot145\cdot0{,}77/0{,}95\cdot1{,}55=24{,}3 \text{ мм},$$

где $\tau=\pi D_1/2p=\pi\cdot185/4=145$ мм;

$$B_{c1}=1{,}55 \text{ Тл по табл. 5.9};$$

высота зубца статора (5.11)

$$h_{z1}=0{,}5(D_{1н}-D_1)-h_{c1}=0{,}5(272-185)-24{,}3=19{,}2 \text{ мм}.$$

Наименьшая ширина паза в штампе (5.13)

$$b_{п1}'=t_1''-b_{z1}=12{,}35-4{,}98=7{,}37 \text{ мм},$$

где $t_1''=\pi(D_1+0{,}2h_{z1})/Z_1=\pi(185+0{,}2\cdot19{,}2)/48=12{,}35$ мм.

Наибольшая ширина паза в штампе (5.15)

$$b_{п1}=t_1'-b_{z1}=14{,}6-4{,}98=9{,}62 \text{ мм},$$

где $t_1'=\pi(D_1+2h_{z1})/Z_1=\pi(185+2\cdot19{,}2)/48=14{,}5$ мм.

Прииимаем ширину шлица $b_{ш1}=3$ мм, высоту $h_{ш1}=0{,}8$ мм, угол $\beta=45°$.

Высота клиновой части паза (5.17)

$$h_{к1}=0{,}5\left(b_{п1}'-b_{ш1}\right)=0{,}5(7{,}37-3)\approx2 \text{ мм}.$$

Высота паза, занимаемая обмоткой (см. рис. 5.6, *а*),

$$h_{п1} = h_{z1} - h_{ш1} - h_{к1} = 19,2 - 0,8 - 2 = 16,4 \text{ мм}.$$

2.8. Размеры закрытого овального паза ротора:

зубцовое деление ротора (5.25)

$$t_2 = \pi D_2/Z_2 = \pi \cdot 184/38 = 15,2 \text{ мм};$$

ширина зубца ротора (5.24)

$$b_{z2} = t_2 B'_\delta / k_{c2} B_{z2max} = 15,2 \cdot 0,77/0,97 \cdot 1,70 = 7,1 \text{ мм},$$

где B_{z2max}=1,70 Тл по табл. 5.10;

высота спинки ротора (5.27)

$$h_{c2} = 0,5\alpha_i \tau B'_\delta / k_{c2} B_{c2} = 0,5 \cdot 0,64 \cdot 145 \cdot 0,77/0,97 \cdot 1,20 = 31 \text{ мм},$$

где B_{c2}=1,2 Тл по табл. 5.10;

высота зубца ротора (5.26)

$$h_{z2} = 0,5\,(D_2 - D_{2вн}) - h_{c2} = 0,5\,(184 - 60) - 31 = 31 \text{ мм}.$$

Диаметр в верхней части паза ротора (5.28)

$$d'_{п2} = \frac{\pi\,(D_2 - 2h_{м2}) - Z_2 b_{z2}}{Z_2 + \pi} = \frac{\pi\,(184 - 2\cdot 0,6) - 38\cdot 7,1}{38 + \pi} = 7,39 \text{ мм},$$

где высота мостика $h_{м2}$=0,6 мм. Принимаем $d'_{п2}$=7,4 мм.

Диаметр в нижней части паза (5.29)

$$d_{п2} = \frac{\pi\,(D_2 - 2h_{z2}) - Z_2 b_{z2}}{Z_2 - \pi} = \frac{\pi\,(184 - 2\cdot 31) - 38\cdot 7,1}{38 - \pi} = 3,25 \text{ мм}.$$

Принимаем $d_{п2}$=3,5 мм.

Расстояние между центрами окружностей овального паза ротора (5.30)

$$h_2 = h_{z2} - h_{м2} - 0,5\left(d_{п2} + d'_{п2}\right) = 31 - 0,6 - 0,5\,(3,5 + 7,4) = 24,9 \text{ мм};$$

площадь овального паза в штампе (5.32)

$$S_{п2} = 0,25\pi\left(d^2_{п2} + d'^2_{п2}\right) + 0,5h_2\left(d_{п2} + d'_{п2}\right) =$$
$$= 0,25\pi\,(3,5^2 + 7,4^2) + 0,5\cdot 24,9\,(3,5 + 7,4) = 188,3 \text{ мм}^3.$$

3. Обмотка статора (см. § 5.4)

3.1. Тип обмотки статора (табл. 5.9) — однослойная всыпная, число параллельных ветвей a_1=2.

3.2. Число пазов на полюс и фазу (5.40)

$$q_1 = Z_1/2pm_1 = 48/4\cdot 3 = 4.$$

Обмоточный коэффициент (5.42) (см. табл. 5.16)

$$k_{об1} = k_{р1} = 0,958.$$

3.3. Шаг по пазам

$$y = 9; \quad 11 \text{ пазов}.$$

3.4. Ток статора в номинальном режиме работы двигателя (5.47)

$$I_{1ном} = \frac{P_{ном}\cdot 10^3}{m_1 U_{1ном}\eta' \cos\varphi'_{1ном}} = \frac{15\cdot 10^3}{3\cdot 380\cdot 0,89\cdot 0,89} = 16,6 \text{ А}.$$

3.5 Число эффективных проводников в пазу статора (5.46)

$$u_п = \frac{10^{-3} A'_1\, t_1\, a_1}{I_{1ном}} = \frac{10^{-3}\cdot 30\cdot 10^3\cdot 12\cdot 2}{16,6} = 43,3,$$

принимаем $u_п$=44 проводника.

3.6. Число последовательных витков в обмотке фазы статора (5.48)

$$w_1 = pq_1 u_п/a_1 = 2\cdot 4\cdot 44/2 = 176.$$

3.7. Плотность тока в обмотке статора принимаем по рис. 5.11

$$\Delta_1 = 6,2 \text{ А/мм}^2.$$

3.8. Сечение эффективного проводника обмотки статора (5.49)

$$q_{1эф} = I_{1ном}/a_1 \Delta_1 = 16,6/2\cdot 6,2 = 1,339 \text{ мм}^2.$$

По табл. П.1.1 принимаем провод с сечением $q_{1эф}$=1,368 мм², диаметром $d_{1эф}$=1,32 мм. В соответствии с классом нагревостойкости изоляции F выбираем обмоточный провод марки ПЭТ-155, $d_{из}$=1,405 мм.

3.9. Толщина изоляции для полузакрытого паза при однослойной обмотке и классе нагревостойкости F (см. табл. 5.12): по высоте $h_{из}$=0,4 мм; по ширине $b_{из}$=0,8 мм.

3.10. Площадь изоляции в пазу (см. табл. 5.12)

$$S_{п.из} = 0,4b'_{п1} + 0,8h_{п1} = 0,4\cdot 7,37 + 0,8\cdot 16,4 = 16,1 \text{ мм}^2.$$

3.11. Площадь паза в свету, занимаемая обмоткой (5.52),

$$S'_п = 0,5\left(b_{п1} + b'_{п1}\right) h_{п1} - S_{п.из} - S_{из.пр} =$$
$$= 0,5\,(9,62 + 7,37)\,16,4 - 16,1 - 0 = 123,2 \text{ мм}^2.$$

3.12. Коэффициент заполнения паза статора изолированными проводниками (5.51)

$$k_{з1} = n_п d^2_{из}/S'_{п1} = 44\cdot 1,405^2/123,2 = 0,71.$$

3.13. Уточненное значение плотности тока в обмотке статора (5.55)

$$\Delta_1 = I_{1ном}/n_{эл}\, q_{1эл}\, a_1 = 16,6/1\cdot 1,368\cdot 2 = 6,06 \text{ А/мм}^2.$$

3.14. Уточненные значения электромагнитных нагрузок (5.56) и (5.57)

$$A_1 = I_{1ном}\, u_п Z_1/10^{-3}\pi D_1 a_1 = 16,6\cdot 44\cdot 48/10^{-3}\pi\cdot 185\cdot 2 = 30,2\cdot 10^3 \text{ А/м};$$
$$B_\delta = \Phi/\alpha_i \tau l_i\cdot 10^{-6} = 0,0098/0,64\cdot 145\cdot 140\cdot 10^{-6} = 0,754 \text{ Тл},$$

где Φ — основной магнитный поток (5.58):

$$\Phi = \frac{k_E U_{1ном}}{4k_в f_1 w_1 k_{об1}} = \frac{0,96\cdot 380}{4\cdot 1,11\cdot 50\cdot 176\cdot 0,958} = 0,0098 \text{ Вб}.$$

3.15. Размеры катушек статора:

среднее зубцовое деление (5.59)

$$t_{1ср} = \pi\,(D_1 + h_{z1})/Z_1 = \pi\,(185 + 20,5)/48 = 13,44 \text{ мм};$$

средняя ширина катушки (5.60)

$$b_{1ср} = t_{1ср}\, y_{1ср} = 13,44\,[(9 + 11)/2] = 134,4 \text{ мм}.$$

3.16. Средняя длина лобовой части катушки (5.61)

$$l_{л1} = (1,16 + 0,14p)\, b_{1ср} + 15 = (1,16 + 0,14\cdot 2)\,134,4 + 15 = 208,5 \text{ мм}.$$

3.17. Средняя длина витка обмотки статора (5.62)

$$l_{ср1} = 2\,(l_1 + l_{л1}) = 2\,(140 + 208,5) = 697 \text{ мм}.$$

3.18. Длина вылета лобовой части обмотки (5.64)

$$l_{\text{в}1} = (0,12 + 0,15p)\, b_{1\text{ср}} + 10 = (0,12 + 0,15\cdot 2)\cdot 134,4 + 10 = 66,5 \text{ мм}.$$

3.19. Активное сопротивление одной фазы обмотки статора, приведенное к рабочей температуре (5.67),

$$r_1 = \rho_{\text{Cu}}\, w_1\, l_{1\text{ср}}\cdot 10^3/n_{\text{эл}}\, q_{1\text{эл}}\, a_1 = 24,4\cdot 10^{-9}\cdot 176\cdot 697\cdot 10^3/1\cdot 1,368\cdot 2 = 1,1 \text{ Ом}.$$

3.20. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния (5.69)

$$\lambda_{\text{п}1} = \frac{h_1}{3b'_{\text{п}1}}\, k_\beta + \left(\frac{h'_1}{b'_{\text{п}1}} + \frac{3h_{\text{к}1}}{b'_{\text{п}1} + 2b_{\text{ш}1}} + \frac{h_{\text{ш}1}}{b_{\text{ш}1}}\right) k'_\beta =$$

$$= \frac{15,5}{3\cdot 7,38} + \frac{0,5}{7,38} + \frac{3\cdot 2}{7,38 + 2\cdot 3} + \frac{0,8}{3} = 1,49,$$

где $k_\beta = 1$ и $k'_\beta = 1$, так как обмотка с диаметральным шагом; значение h_1 определяем по рис. 5.12, *а* с помощью табл. 5.12:

$$h_1 = h_{z1} - h_{\text{ш}1} - h_{\text{к}1} - h'_1 - h_{\text{из}} = 19,2 - 0,8 - 2,0 - 0,5 - 0,4 = 15,5 \text{ мм}.$$

3.21. Коэффициент воздушного зазора (5.74) и (5.75)

$$k_\delta = k_{\delta 1} = 1 + \{b_{\text{ш}1}/[t_1 - b_{\text{ш}1} + (5\delta t_1/b_{\text{ш}1})]\} = 1 + \left\{3/\left[12 - 3 + \frac{5\cdot 0,5\cdot 12}{3}\right]\right\} =$$

$$= 1,16.$$

3.22. Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния (5.72)

$$\lambda_{\text{д}1} = 0,9\, t_1\, (q_1\, k_{\text{об}1})^2\, k_{\text{р,т}1}\, k_{\text{ш}1}\, k_{\text{д}1}/(\delta k_\delta) =$$

$$= 0,9\cdot 12\, (4\cdot 0,958)^2\cdot 0,84\cdot 0,95\cdot 0,0089/0,5\cdot 1,16 = 1,47,$$

где при $Z_1/p = 19$ по табл. 5.18 $k_{\text{р,т}1} = 0,84$; по табл. 5.19 при $q_1 = 4$ для однослойной обмотки $k_{\text{д}1} = 0,0089$; коэффициент $k_{\text{ш}1}$ (5.73)

$$k_{\text{ш}1} = 1 - 0,033 b^2_{\text{ш}1}/t_1\,\delta = 1 - 0,033\cdot 3^2/12\cdot 0,5 = 0,95.$$

3.23. Коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей обмотки статора (5.77)

$$\lambda_{\text{л}1} = 0,34\,\frac{q_1}{l_1}\,(l_{\text{л}1} - 0,64\beta\tau) = 0,34\,\frac{4}{140}\,(208,5 - 0,64\cdot 1\cdot 145) = 1,12.$$

3.24. Коэффициент магнитной проводимости рассеяния обмотки статора (5.78)

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{п}1} + \lambda_{\text{д}1} + \lambda_{\text{л}1} = 1,49 + 1,47 + 1,12 = 4,08.$$

3.25. Индуктивное сопротивление рассеяния одной фазы обмотки статора (5.79)

$$x_1 = \frac{1,58 f_1\, l_1\, w_1^2}{p q_1\, 10^8}\,\lambda_1 = \frac{1,58\cdot 50\cdot 140\cdot 176^2}{2\cdot 4\cdot 10^8}\cdot 4,08 = 1,74 \text{ Ом}.$$

4. Обмотка короткозамкнутого ротора (см. § 5.5)

4.1. Рабочий ток в стержне ротора (5.82)

$$I_{\text{ст}} = I_2 = 1,1 \cos\varphi'_1\, I_{\text{ном}}\,\frac{6w_1\, k_{\text{об}1}}{Z_2} = 1,1\cdot 0,89\cdot 16,6\cdot 6\cdot 176\cdot 0,958/38 = 432,6 \text{ А}.$$

4.2. Плотность тока в стержне ротора (5.83)

$$\Delta_2 = I_{\text{ст}}/q_{\text{ст}} = 432,6/188,3 = 2,30 \text{ А/мм}^2,$$

где $q_{\text{ст}} = S_{\text{п}2} = 188,3$ мм² (см. п. 2.8).

4.3. Размеры короткозамыкающего кольца (см. рис. 5.14):

поперечное сечение (5.84)

$$q_{\text{кл}} = 0,35 Z_2\, q_{\text{ст}}/2p = 0,35\cdot 38\cdot 188,3/4 = 626 \text{ мм}^2;$$

высота кольца (5.85)

$$h_{\text{кл}} = 1,13\, h_{z2} = 1,13\cdot 31 = 35,2 \text{ мм};$$

длина кольца (5.86)

$$l_{\text{кл}} = q_{\text{кл}}/h_{\text{кл}} = 626/35,2 = 17,8 \text{ мм};$$

средний диаметр кольца (5.87)

$$D_{\text{кл,ср}} = D_2 - h_{\text{кл}} = 184 - 35,2 = 148,8 \text{ мм}.$$

4.4. Активное сопротивление стержня клетки (5.88):

расчетная глубина проникновения тока в стержень (5.90) (см. рис. 5.15)

$$h_{\text{г,п}} = h_{\text{ст}}/(1 + \varphi).$$

Для определения φ рассчитаем коэффициент ξ. В начальный момент пуска ($s = 1$) для алюминиевой литой клетки при рабочей температуре 115 °С (5.91)

$$\xi_{115} = 0,064 h_{\text{ст}} \sqrt{s} = 0,064\,(31 - 0,6) = 2,0;$$

по рис. 5.16 $\varphi = 1,0$, тогда $h_{\text{г,п}} = (31 - 0,6)/(1 + 1,0) = 15,2$ мм;

ширина стержня на расчетной глубине проникновения тока (5.92)

$$b_{\text{г,п}} = d'_{\text{п}2} - \frac{d'_{\text{п}2} - d_{\text{п}2}}{h_2}\left(h_{\text{г,п}} - 0,5 d'_{\text{п}2}\right) = 7,39 - \frac{7,39 - 3,5}{24,9}\,(15,2 - 0,5\cdot 7,39) =$$

$$= 6,82 \text{ мм}.$$

Площадь сечения стержня при расчетной глубине проникновения тока (5.93)

$$q_{\text{г,п}} = 0,4 d'^2_{\text{п}2} + \left[0,5\left(d'_{\text{п}2} + b_{\text{г,п}}\right)\left(h_{\text{г,п}} - 0,5 d'_{\text{п}2}\right)\right] = 0,393\cdot 7,39^2 +$$

$$+ [0,5\,(7,39 + 6,82)\,(15,2 - 0,5\cdot 7,39)] = 84,5 \text{ мм}^2;$$

коэффициент $k_{\text{в,т}} = q_{\text{ст}}/q_{\text{г,п}} = 188,3/84,5 = 2,22$.

Активное сопротивление стержня в рабочем режиме ($k_{\text{в,т}} = 1$), приведенное к рабочей температуре 115 °С (5.88),

$$r_{\text{ст}} = \rho_{\text{Al}}\, l_2 10^{-3}/q_{\text{ст}} = 48,8\cdot 10^{-9}\cdot 140\cdot 10^3/188,3 = 3,63\cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

активное сопротивление стержня клетки при $s = 1$ с учетом вытеснения тока

$$r_{\text{ст,п}} = r_{\text{ст}}\, k_{\text{в,т}} = 3,63\cdot 10^{-5}\cdot 2,22 = 8,05\cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

4.5 Активное сопротивление короткозамыкающих колец (5.94)

$$r_{\text{кл}} = 2\pi D_{\text{кл,ср}}\, \rho_{\text{Al}}\cdot 10^3/Z_2 q_{\text{кл}} = 2\pi 148,8\cdot 48,8\cdot 10^{-9}/38\cdot 626 = 0,191\cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

4.6. Активное сопротивление колец ротора, приведенное к току стержня (5.95),

$$r''_{\text{кл}} = r_{\text{кл}}/k_{\text{пр}2} = 0,191\cdot 10^{-5}/0,33 = 0,58\cdot 10^{-5} \text{ Ом},$$

где $k_{\text{пр}2}$ — коэффициент приведения; при $Z_2/2p = 38/4 = 9,5 > 6$

$$k_{\text{пр}2} \approx 2\pi p/Z_2 = 2\pi\cdot 2/38 = 0,33.$$

4.7. Центральный угол скоса пазов (5.98)

$$\alpha_{ск} = \pi \cdot 2p\beta_{ск}/Z_2 = \pi \cdot 4 \cdot 0,79/38 = 0,26,$$

где $\beta_{ск} = t_1/t_2 = 12/15,2 = 0,79$.

4.8. Коэффициент скоса пазов (табл. 5.20)

$$k_{ск} = 0,998.$$

4.9. Коэффициент приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора (5.101)

$$k_{пр1} = 4\,(m_1/Z_2)\,(w_1 k_{об1}/k_{ск})^2 = 4\,(3/38)\,(176 \cdot 0,958/998)^2 = 8,86 \cdot 10^3.$$

4.10. Активное сопротивление обмотки ротора, првведенное к обмотке статора (5.99):

в рабочем режиме

$$r_2' = k_{пр1}\left(r_{ст} + r''_{кл}\right) = 8,86 \cdot 10^3\,(3,63 + 0,58) \cdot 10^{-5} = 0,37 \text{ Ом};$$

в начальный момент пуска с учетом вытеснения тока

$$r_{2п}' = k_{пр1}\left(r_{ст,п} + r''_{кл}\right) = 8,86 \cdot 10^3\,(8,05 + 0,58) \cdot 10^{-5} = 0,765 \text{ Ом}.$$

4.11. Коэффициент магнитной проводимости рассеяния пазов ротора (5.103):

в номинальном режиме

$$\lambda_{п2} = C_\lambda + 0,3 + \left(1,12 h_{м2} \cdot 10^3/I_2\right),$$

где C_λ находим по (5.104):

$$C_\lambda = \frac{24,9 + 0,4 \cdot 3,5}{3 \cdot 7,4}\left(1 - \frac{\pi 7,4^2}{8 \cdot 188,3}\right)^2 + 0,66 = 1,588;$$

$$\lambda_{п2} = 1,588 + 0,3 + (1,12 \cdot 0,6 \cdot 10^3/432,6) = 3,43;$$

в начальный момент пуска с учетом вытеснения тока [$\xi_{115} = 2,0$; $\psi = 0,75$ (см. рис. 5.16)]

$$C_\lambda' = \psi \cdot 1,588 = 0,75 \cdot 1,588 = 1,19;$$

$$\lambda_{п2}' = 1,19 + 0,3 + (1,12 \cdot 0,6 \cdot 10^3/432,6) = 3,04.$$

4.12. Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния (5.105)

$$\lambda_{д2} = 0,9 t_2\left(Z_2/6p\right)^2 k_{д2}/\delta k_\delta = 0,9 \cdot 15,2\,(38/6 \cdot 2)^2\,0,009/(0,5 \cdot 1,16) = 2,13,$$

где $k_{д2} = 0,009$ по рис. 5.17 при $q_2 = 38/3 \cdot 4 = 3,17$.

4.13. Коэффициент магнитной проводимости рассеяния короткозамыкающих колец клетки ротора (5.107)

$$\lambda_{кл} = \frac{2,3 D_{кл,ср}}{Z_2 l_2 k_{пр}^2}\lg\frac{4,7 D_{кл,ср}}{2h_{кл} + 2l_{кл}} = \frac{2,3 \cdot 148,8}{38 \cdot 140 \cdot 0,33^2}\lg\frac{4,7 \cdot 148,8}{2 \cdot 35,2 + 2 \cdot 17,8} = 0,55.$$

4.14. Коэффициент магнитной проводимости рассеяния скоса пазов ротора (5.108)

$$\lambda_{ск} = \frac{t_2 \beta_{ск}^2}{9,5 \delta k_\delta k_\mu'} = \frac{15,2 \cdot 0,8^2}{9,5 \cdot 0,5 \cdot 1,16 \cdot 1,3} = 1,36,$$

где принимаем $k_\mu' = 1,3$.

4.15. Коэффициент магнитной проводимости рассеяния обмотки ротора (5.109)

$$\lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ск};$$

в номинальном режиме

$$\lambda_2 = 3,43 + 2,13 + 0,55 + 1,36 = 7,47;$$

в начальный момент пуска

$$\lambda_2' = 3,04 + 2,13 + 0,55 + 1,36 = 7,08.$$

4.16. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора (5.110):

в иоминальном режиме

$$x_2 = 7,9 f_1 l_2 \lambda_2 \cdot 10^{-9} = 7,9 \cdot 50 \cdot 140 \cdot 7,47 \cdot 10^{-9} = 0,42 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

в начальный момент пуска

$$x_{2п} = 7,9 f_1 l_2 \lambda_2' \cdot 10^{-9} = 7,9 \cdot 50 \cdot 140 \cdot 7,08 \cdot 10^{-9} = 0,40 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

4.17. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора (5.110а):

в номинальном режиме

$$x_2' = k_{пр1} x_2 = 8,86 \cdot 10^3 \cdot 0,42 \cdot 10^{-3} = 3,8 \text{ Ом};$$

в начальный момент пуска

$$x_{2п}' = k_{пр1} x_{2п} = 8,86 \cdot 10^3 \cdot 0,40 \cdot 10^{-3} = 3,5 \text{ Ом}.$$

5. Магнитная цепь (см. § 5.7)

Сердечники статора и ротора выполняем из листовой электротехнической стали марки 2013 толщиной 0,5 мм.

5.1. Магнитное напряжение воздушного зазора (5.151)

$$F_\delta = 0,8 B_\delta\,\delta k_\delta \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 0,754 \cdot 0,5 \cdot 1,16 \cdot 10^3 = 350 \text{ А}.$$

5.2. Магнитная индукция в зубце статора (5.153)

$$B_{z1} = B_\delta t_1/k_{c1} b_{z1} = 0,754 \cdot 12/0,95 \cdot 4,98 = 1,91 \text{ Тл}.$$

5.3. Напряженность магнитного поля в зубце статора H_{z1} определяем по кривым намагвичивания для зубцов стали марки 2013, так как $B_{z1} > 1,8$ Тл (см. рис. П.2.1). Коэффициент, учитывающий ответвление части магнитного потока в паз (5.154),

$$k_{п1} = t_{1(1/3)}/b_{z1} k_{c1} = 12,90/4,98 \cdot 0,97 = 2,68,$$

где $t_{1(1/3)} = \pi[D_1 + (2/3)h_{z1}]/Z_1 = \pi[185 + (2/3)\,19,2]/48 = 12,90$ мм.

По рис. П.2.1 при $B_{z1} = 1,91$ и $k_{п1} = 2,68$ принимаем $H_{z1} = 2000$ А/м.

5.4. Магнитное напряжение зубцового слоя статора (5.156)

$$F_{z1} = 10^{-3} H_{z1} h_{z1} = 10^{-3} \cdot 2000 \cdot 19,2 = 38,4 \text{ А}.$$

5.5 Магнитная индукция в зубце ротора (5.169)

$$B_{z2} = B_\delta t_2/k_{c2} b_{z2} = 0,754 \cdot 15,2/0,97 \cdot 7,1 = 1,66 \text{ Тл}.$$

5.6. Напряженность поля в зубце ротора: так как $B_{z2} < 1,8$ Тл, то H_{z2} определяем по таблице намагничиваиия зубцов асинхронных двигателей для стали марки 2013 (см. табл. П.2.3); $H_{z2} = 1020$ А/м.

5.7. Магнитное напряжение зубцового слоя ротора (5.172)

$$F_{z2} = 10^{-3} H_{z2}\,(h_{z2} - 0,4 d_{п2}) = 10^{-3} \cdot 1020\,(32 - 0,4 \cdot 3,5) = 31,2 \text{ А}.$$

5.8. Коэффициент насыщения зубцового слоя статора и ротора (5.188)

$$k_{\mu z} = (F_\delta + F_{z1} + F_{z2})/F_\delta = (350 + 38,4 + 31,2)/350 = 1,19.$$

5.9. Магнитная индукция в спинке статора (5.189)

$$B_{c1} = 0,5\alpha_i \tau B_\delta / h_{c1} k_{c1} = 0,5 \cdot 0,64 \cdot 145 \cdot 0,754/24,3 \cdot 0,95 = 1,51 \text{ Тл}.$$

5.10. Напряженность магнитного поля в спинке статора по таблице намагничивания спинки асинхронных двигателей для стали марки 2013 (см. табл. П.2.2)

$$H_{c1} = 542 \text{ А/м}.$$

5.11. Длина средней силовой линии в спинке статора (5.191)

$$L_{c1} = \pi (D_{1н} - h_{c1})/2p = \pi (272 - 24,7)/4 = 194 \text{ мм}.$$

5.12. Магнитное напряжение в спинке статора (5.190)

$$F_{c1} = 10^{-3} H_{c1} L_{c1} = 10^{-3} \cdot 542 \cdot 194 = 105 \text{ А}.$$

5.13. Магнитная индукция в спинке ротора (5.189)

$$B_{c2} = 0,5\alpha_i \tau B_\delta / h_{c2} k_{c2} = 0,5 \cdot 0,64 \cdot 145 \cdot 0,754/31 \cdot 0,97 = 1,16 \text{ Тл}.$$

5.14. Напряженность магнитного поля в спинке ротора по таблице намагничивания для спинки асинхронных двигателей (см. табл. П.2.2)

$$H_{c2} = 245 \text{ А/м}.$$

5.15. Длина средней силовой линии в спинке ротора (5.193)

$$L_{c2} = [(\pi/2p)(D_2 - 2h_{z2} - h_{c2})] + h_{c2} = [(\pi/4)(184 - 2 \cdot 31 - 31)] + 31 = 126 \text{ мм}.$$

5.16. Магнитное напряжение в спинке ротора (5.192)

$$F_{c2} = 10^{-3} H_{c2} L_{c2} = 10^{-3} \cdot 245 \cdot 126 = 31 \text{ А}.$$

5.17. Суммарная МДС на пару полюсов (5.151)

$$\Sigma F = 2F_\delta + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{c1} + F_{c2} = 2 \cdot 350 + 2 \cdot 38,4 + 2 \cdot 31,2 + 105 + 31,0 = 975 \text{ А}.$$

5.18. Коэффициент насыщения магнитной цепи двигателя (5.195)

$$k_\mu = \Sigma F / 2F_\delta = 975/2 \cdot 350 = 1,39.$$

5.19. Намагничивающий ток статора (5.196)

$$I_\mu = p\Sigma F / 0,9 m_1 w_1 k_{об1} = 2 \cdot 975/0,90 \cdot 3 \cdot 176 \cdot 0,958 = 4,28 \text{ А}.$$

5.20. Главное индуктивное сопротивление обмотки статора (5.199)

$$x_m = k_E U_{1ном}/I_\mu = 0,96 \cdot 380/4,28 = 85,2 \text{ Ом}.$$

5.21. Коэффициент магнитного рассеяния (5.198)

$$\sigma_\mu = x_1/x_m = 1,74/85,2 = 0,02;$$

так как $k_\mu < 1,7$ и $\sigma_\mu = 0,02 < 0,05$, то расчета ЭДС E_0 не требуется.

6. Потери и КПД (см. § 6.1)

6.1. Основные магнитные потери в спинке статора (6.5)

$$P_{м,c1} = 1,7 P_{1,0/50} B_{c1}^2 G_{c1} = 1,7 \cdot 2,5 \cdot 1,51^2 \cdot 19 = 184 \text{ Вт},$$

где G_{c1} — расчетная масса спинки статора (6.3):

$$G_{c1} = 7,8 \cdot 10^{-6} l_i k_{c1} h_{c1} \pi (D_{1н} - h_{c1}) = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 0,95 \cdot 24,3\pi(272 - 24,3) = 19 \text{ кг}.$$

6.2. Основные магнитные потери в зубцах статора (6.6)

$$P_{Mz1} = 1,7 P_{1,0/50} B_{z1}^2 G_{z1} = 1,7 \cdot 2,5 \cdot 1,91^2 \cdot 5,2 = 80,6 \text{ Вт},$$

где G_{z1} — расчетная масса стали зубцового слоя (6.4):

$$G_{z1} = 7,8 \cdot 10^{-6} l_i k_{c1} [h_{z1} \pi (D_1 + h_{z1}) - S_{п1} Z_1] = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 0,95 [19,2\pi (182 - 19,2) - 154 \cdot 48] = 5,2 \text{ кг};$$

$S_{п1}$ — площадь паза в штампе (5.19):

$$S_{п1} = 0,5 (b_{п1} + b'_{п1}) h_{п1} + 0,5 (b'_{п1} + b_{ш1}) h_{к1} + b_{ш1} h_{ш1} = 0,5 (9,62 + 7,38) 16,4 + 0,5 (7,38 + 3) \cdot 2 + 3 \cdot 0,8 = 154 \text{ мм}^2.$$

6.3. Основные магнитные потери (6.7)

$$P_м = P_{м,c1} + P_{Mz1} = 184 + 80,6 = 264,6 \text{ Вт}.$$

6.4 Электрические потери в обмотке статора (6.8)

$$P_{э1} = m_1 I_1^2 r_1 = 3 \cdot 16,6^2 \cdot 1,1 = 909 \text{ Вт}.$$

6.5. Электрические потери в обмотке ротора (6.9)

$$P_{э2} = m_2 I_2^2 r_2 = 38 \cdot 432,6^2 \cdot 4,21 \cdot 10^{-5} = 299 \text{ Вт},$$

$$\text{где } r_2 = r_{ст} + r''_{кл} = (3,63 + 0,58) \cdot 10^{-5} = 4,21 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

6.6. Механические потери (6.13)

$$P_{мех} = k_т (n_1 \cdot 10^{-3})^2 (D_{1н} \cdot 10^{-2})^4 = 1 (1500 \cdot 10^{-3})^2 (272 \cdot 10^{-2}) = 123 \text{ Вт};$$

так как $2p=4$, то $k_т=1$.

6.7. Добавочные потери (6.19) при номинальной нагрузке двигателя

$$P_{доб} = 0,005 P_{ном} \cdot 10^3/\eta' = 0,005 \cdot 15 \cdot 10^3/0,89 = 85 \text{ Вт}.$$

6.8. Суммарные потери (6.22)

$$\Sigma P = (P_м + P_{э1} + P_{э2} + P_{мех} + P_{доб}) \cdot 10^{-3} = (264,6 + 909 + 299 + 123 + 85) \cdot 10^{-3} = 1,68 \text{ кВт}.$$

6.9. Подводимая к двигателю мощность (6.23)

$$P_1 = P_{ном} + \Sigma P = 15 + 1,68 = 16,68 \text{ кВт}.$$

6.10. КПД двигателя (6.21)

$$\eta = P_{ном}/P_1 = 15/16,68 = 0,90.$$

7. Рабочие характеристики (см. § 6.6)

7.1. Расчетное сопротивление (6.69)

$$R' = r'_2 \left\{ \left[\frac{r_1}{r'_2} \left(1 + \frac{x'_2}{x_m}\right) \right]^2 + \left[\frac{x_1}{r'_2} \left(1 + \frac{x'_2}{x_m}\right) + \frac{x'_2}{r'_2} \right]^2 \right\} =$$

$$= 0,37 \left\{ \left[\frac{1,1}{0,37} \left(1 + \frac{3,8}{82,2}\right) \right]^2 + \left[\frac{1,74}{0,37} \left(1 + \frac{3,8}{82,2}\right) + \frac{3,8}{0,37} \right]^2 \right\} = 89,2 \text{ Ом}.$$

7.2. Полная механическая мощность (6.70)

$$P'_2 = P_2 + P_{доб} + P_{мех} = 15\,000 + 85 + 123 = 15\,208 \text{ Вт}.$$

7.3. Величина A (6.67)

$$A = m_1 U_{1ном}^2 / (2P'_2) - r_1 = 3 \cdot 380^2/(2 \cdot 15\,208) - 1,1 = 13,12.$$

7.4. Величина B (6.68)

$$B = 2A + R' = 2\cdot 13{,}12 + 89{,}2 = 115{,}44.$$

7.5. Скольжение (6.66)

$$s_{\text{ном}} = \left[A - \sqrt{A^2 - c_1^2 r_2' B}\right] / B = \left[13{,}12 - \sqrt{13{,}12^2 - 1{,}02^2\cdot 0{,}37\cdot 115{,}44}\right] / /115{,}44 = 0{,}016,$$

где $c_1 = 1 + x_1/x_m = 1 + 1{,}74/85{,}2 = 1{,}02$.

7.6. Эквивалентные сопротивления рабочей цепи схемы замещения: активное (6.72)

$$r_{\text{экв}} = c_1 r_1 + c_1^2 r_2'/s = 1{,}02\cdot 1{,}1 + 1{,}02^2\cdot 0{,}37/0{,}016 = 25{,}12 \text{ Ом};$$

индуктивное (6.73)

$$x_{\text{экв}} = c_1 x_1 + c_1^2 x_2' = 1{,}02\cdot 1{,}74 + 1{,}02^2\cdot 3{,}8 = 5{,}72 \text{ Ом};$$

полное (6.71)

$$z_{\text{экв}} = \sqrt{r_{\text{экв}}^2 + x_{\text{экв}}^2} = \sqrt{25{,}12^2 + 5{,}72^2} = 25{,}7 \text{ Ом}.$$

7.7. Коэффициент мощности в рабочей цепи схемы размещения (6.76)

$$\cos\varphi_2' = r_{\text{экв}}/z_{\text{экв}} = 25{,}12/25{,}7 = 0{,}977.$$

7.8. Ток в рабочей цепи схемы замещения: полный (6.75)

$$I_2'' = U_{1\text{ном}}/z_{\text{экв}} = 380/25{,}7 = 14{,}78 \ A;$$

активная составляющая тока (6.77)

$$I_{2a}'' = I_2'' \cos\varphi_2' = 14{,}78\cdot 0{,}977 = 14{,}44 \ A;$$

реактивная составляющая тока (6.78)

$$I_{2p}'' = I_2'' \sin\varphi_2' = 14{,}78\cdot 0{,}214 = 3{,}16 \text{ А}.$$

7.9. Ток статора: активная составляющая (6.79)

$$I_{1a} = I_{0a} + I_{2a}'' = 0{,}392 + 14{,}44 = 14{,}80 \ A;$$

реактивная составляющая (6.80)

$$I_{1p} = I_{0p} + I_{2p}'' = 4{,}28 + 3{,}16 = 7{,}44 \text{ А};$$

полный ток (6.83)

$$I_{1\text{ном}} = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} = \sqrt{14{,}80^2 + 7{,}44^2} = 16{,}6 \text{ А}.$$

7.10. Коэффициент мощности (6.84)

$$\cos\varphi_{1\text{ном}} = I_{1a}/I_{1\text{ном}} = 14{,}80/16{,}6 = 0{,}89.$$

7.11. Потребляемая двигателем мощность (6.85)

$$P_{1\text{ном}} = m_1 U_{1\text{ном}} I_{1a} = 3\cdot 380\cdot 14{,}80 = 16\,870 \text{ Вт}.$$

7.12. Электромагнитная мощность (6.11)

$$P_{\text{эн}} = P_1 - (P_{\text{э1}} + P_{\text{М}})\cdot 10^3 = 16\,870 - (909 + 264{,}6)\cdot 10^{-3} = 15{,}7 \text{ кВт}.$$

7.13. Частота вращения ротора (6.86)

$$n_{\text{ном}} = n_1 (1 - s_{\text{ном}}) = 1500\,(1 - 0{,}016) = 1476 \text{ об/мин}.$$

7.14 Электромагнитный момент (6.87)

$$M_{\text{ном}} = 9{,}55 P_{\text{эм}}\cdot 10^3/n_{\text{ном}} = 9{,}55\cdot 15{,}7\cdot 10^3/1476 = 101 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

7.15. КПД двигателя

$$\eta = P_{\text{ном}}/P_{1\text{ном}} = 15{,}0/16{,}87 = 0{,}89.$$

В табл. 6.3 приведены результаты расчета рабочих характеристик двигателя Рабочие характеристики двигателя представлены на рис. 6.4.

7.16. Критическое скольжение (6.89)

$$s_{\text{кр}}' \approx c_1 r_2' / (x_1 + c_1 x_2') = 1{,}02\cdot 0{,}37/(1{,}74 + 1{,}02\cdot 3{,}8) = 0{,}067.$$

7.17. Перегрузочная способность двигателя (6.88)

$$\frac{M_{max}}{M_{\text{ном}}} \approx \frac{(s_{\text{ном}}/s_{\text{кр}}) + (s_{\text{кр}}/s_{\text{ном}}) + R_{\text{кр}}}{2 + R_{\text{кр}}} = \frac{(0{,}016/0{,}067) + (0{,}067/0{,}016) + 0{,}39}{2 + 0{,}39} = 2{,}01,$$

где $R_{\text{кр}} = 2 r_1 s_{\text{кр}}/c_1 r_2' = 2\cdot 1{,}1\cdot 0{,}067/1{,}02\cdot 0{,}37 = 0{,}39$ Ом.

8. Пусковые параметры двигателя

8.1. Активное сопротивление короткого замыкания при $s = 1$ (6.46)

$$r_{\text{к,п}}' = c_1 r_1 + c_1^2 r_{2\text{п}}' = 1{,}02\cdot 1{,}1 + 1{,}02^2\cdot 0{,}765 = 1{,}92 \text{ Ом},$$

где $r_{2\text{п}}' = 0{,}765$ (см. п. 4.10).

8.2. Составляющая коэффициента пазового рассеяния статора, зависящая от насыщения (6.47),

$$\lambda_{\text{п1 пер}} = \left(\frac{3h_{\text{к1}}}{b_2' + 2b_{\text{ш1}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш1}}}\right) k_\beta' = \left(\frac{3\cdot 2}{7{,}38 + 2\cdot 3} + \frac{0{,}8}{3}\right)\cdot 1 = 0{,}686.$$

8.3. Переменная составляющая коэффициента проводимости рассеяния статора (6.50)

$$\lambda_{1\text{пер}} = \lambda_{\text{п1 пер}} + \lambda_{\text{д1}} = 0{,}686 + 1{,}47 = 2{,}16,$$

где $\lambda_{\text{д1}}$ см. в п. 3.22.

8.4. Составляющая коэффициента пазового рассеяния ротора, зависящая от насыщения (6.52),

$$\lambda_{\text{п2 пер}} = 1{,}12\cdot 10^3 h_{\text{М2}}/I_2 = 1{,}12\cdot 10^3\cdot 0{,}6/432{,}6 = 1{,}55.$$

8.5. Переменная составляющая коэффициента проводимости рассеяния ротора (6.54)

$$\lambda_{2\text{пер}} = \lambda_{\text{п2 пер}} + \lambda_{\text{д2}} = 1{,}55 + 2{,}13 = 3{,}68,$$

где $\lambda_{\text{д2}}$ см. в п. 4.12.

8.6. Переменная составляющая индуктивного сопротивления короткого замыкания (6.55)

$$x_{\text{пер}} = (c_1 x_1 \lambda_{1\text{пер}}/\lambda_1) + + (c_1^2 x_{2\text{п}}' \lambda_{2\text{пер}}/\lambda_2') = (1{,}02\cdot 1{,}74\cdot 2{,}16/4{,}08) + (1{,}02^2\cdot 3{,}5\cdot 3{,}68/7{,}08) = 2{,}84 \text{ Ом},$$

где λ_1 см. в п. 3.24, λ_2' — в п. 4.15.

Таблица 6.3

Расчетная формула	Относительная мощность				
	0,25	0,50	0,75	1,0	1,25
$P_2 = P_{ном} P_{2*}$, Вт	3750	7500	11 250	15 000	18 750
$P'_{доб} = P_{доб} P_{2*}^2$, Вт	5,3	21,2	47,8	85	133
$P'_2 = P_2 + P'_{доб} + P_{мех} + P_{мех,щ}$, Вт	3878	7644	11 421	15 208	19 006
$A = m_1 U^2_{1ном}/(2P'_2) - r_1$	54,2	27,4	18	13,12	9,2
$B = 2A + R'$	197,6	144	125,2	115,44	107,6
$s = [A - \sqrt{A^2 - c_1^2 r'_2 B}]/B$	0,004	0,006	0,010	0,016	0,021
$r_{экв} = c_1 r_1 + c_1^2 r'_2/s$, Ом	97,1	60,1	38,0	25,12	20,3
$x_{экв} = c_1 x_1 + c_1^2 x'_2$, Ом	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72
$z_{экв} = \sqrt{r^2_{экв} + x^2_{экв}}$, Ом	97,5	60,5	38,6	25,7	20,9
$\cos \varphi'_2 = r_{экв}/z_{экв}$	0,996	0,993	0,984	0,977	0,968
$I''_2 = U_1/z_{экв}$, А	3,90	6,80	9,84	14,78	17,30
$I''_{2а} = I''_2 \cos \varphi'_2$, А	3,88	6,76	9,78	14,44	18,2
$I''_{2р} = I''_2 \sin \varphi'_2$, А	0,36	0,69	1,74	3,16	4,32
$I_{1а} = I_{0а} + I''_{2а}$, А	4,27	7,45	10,2	14,80	18,6
$I_{1р} = I_{0р} + I''_{2р}$, А	4,64	4,97	6,02	7,44	8,60
$I_1 = \sqrt{I^2_{1а} + I^2_{1р}}$, А	6,3	7,9	11,6	16,6	20,2
$\cos \varphi_1 = I_{1а}/I_1$	0,680	0,778	0,87	0,893	0,890
$P_1 = m_1 U_1 I_{1а}$, Вт	4867	8823	11 628	16 870	21 204
$\eta = P_2/P_1$	0,77	0,85	0,96	0,89	0,88
$P_{э1} = m_1 I_1^2 r_1$, Вт	131	206	444	909	1346
$P_{эм} = P_1 - (P_{э1} + P_{м}) \cdot 10^{-2}$, кВт	4,47	8,35	10,92	15,70	19,60
$n_2 = n_1 (1 - s)$, об/мин	1494	1491	1485	1476	1468
$M = 9,55 \cdot 10^3 P_{эм}/n_2$, Н·м	28,5	53,0	70,2	101,0	127,5

8.7. Постоянная составляющая индуктивного сопротивления короткого замыкания (6.57)

$$x_{пост} = c_1 x_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{1пер}}{\lambda_1} + c_1^2 x'_{2п} \frac{\lambda'_2 - \lambda_{2пер}}{\lambda'_2} =$$

$$= 1,02 \cdot 1,74 \frac{4,08 - 2,16}{4,08} + 1,02^2 \cdot 3,5 \frac{7,08 - 3,68}{7,08} = 2,66 \text{ Ом}.$$

8.8 Индуктивное сопротивление короткого замыкания для пускового режима (6.59)

$$x'_{к,п} \approx x_{пост} + k_x x_{пер} = 2,66 + 0,25 \cdot 2,84 = 3,37 \text{ Ом},$$

где $k_x = 0,25$.

8.9. Начальный пусковой ток (6.91)

$$I_{1п} \approx U_{1ном} \Big/ \sqrt{r'^2_{к,п} + x'^2_{к,п}} = 380 \Big/ \sqrt{1,92^2 + 3,37^2} = 97,6 \text{ А},$$

кратность пускового тока

$$I_{1п}/I_{1ном} = 97,4/16,6 = 5,86.$$

8.10. Начальный пусковой момент (6.92а)

$$M_п = p m_1 I_{1п}^2 r'_{2п}/2\pi f_1 = 2 \cdot 3 \cdot 97,6^2 \cdot 0,765/2\pi \cdot 50 = 139 \text{ Н·м},$$

кратность пускового тока

$$M_п/M_{ном} = 139/101 = 1,37.$$

9. Тепловой расчет (см. § 6.7)

9.1. Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя (6.93)

$$\Delta\Theta_{пов1} = k \frac{k_\Theta P_{э1} (2l_1/l_{ср1}) + P_м}{\pi D_1 l_1 \alpha_1} =$$

$$= 0,2 \frac{1,07 \cdot 909 \cdot (2 \cdot 140/697) + 264,6}{3,14 \cdot 185 \cdot 140 \cdot 11,5 \cdot 10^{-5}} = 14 \text{ °C},$$

где $\alpha_1 = 11,2 \cdot 10^{-5}$ Вт/(мм²·°С); $k = 0,2$ и $k_\Theta = 1,07$.

9.2. Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора (6.94)

$$\Delta\Theta_{из1} = \frac{k_\Theta P_{э1} (2l_1/l_{ср1})}{Z_1 \Pi_1 l_1} \left(\frac{c_{п1}}{\lambda_{экв}} + \frac{b_{п1} + b'_{п1}}{16\lambda'_{экв}} \right) =$$

$$= \frac{1,07 \cdot 909 (2 \cdot 140/697)}{48 \cdot 50 \cdot 140} \left(\frac{0,4}{16 \cdot 10^{-5}} + \frac{9,62 + 7,38}{16 \cdot 130 \cdot 10^{-5}} \right) = 3,8 \text{ °C},$$

где $\Pi_1 = 2h_{п1} + b'_{п1} + b_{п1} = 2 \cdot 16,4 + 7,4 + 9,6 = 50$ мм; по рис. 6.7 при $d/d_{из} = 1,32/1,405 = 0,94$

$$\lambda'_{экв} = 130 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(мм·°С)}.$$

9.3. Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя (6.97)

$$\Delta\Theta_{л1} = \frac{kk_\Theta P_{э1}(2l_{л1}/l_{ср1})}{2\pi D_1 l_{в1}\alpha_1} = \frac{0,2\cdot 1,07\cdot 909\,(2\cdot 208,5/697)}{2\cdot 3,14\cdot 185\cdot 66,5\cdot 11,5\cdot 10^{-5}} = 13,0\ ^\circ C.$$

9.4. Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки статора (6.98). Так как лобовая часть обмотки статора не имеет дополнительной изоляции, то первое слагаемое в скобках выражения (6.98) равно нулю:

$$\Delta\Theta_{из,л1} = \frac{k_\Theta P_{э1}(2l_{л1}/l_{ср1})}{2Z_1 \Pi_{л1} l_{л1}}\ \frac{h_{пі}}{12\lambda'_{экв}} =$$

$$= \frac{1,07\cdot 909\,(2\cdot 208,5/697)}{2\cdot 48\cdot 50,3\cdot 208,5}\ \frac{16,4}{1,2\cdot 130\cdot 10^{-5}} = 6\ ^\circ C.$$

9.5. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя (6.101)

$$\Delta\Theta'_1 = (\Delta\Theta_{пов1} + \Delta\Theta_{из1})\frac{2l_1}{l_{ср1}} + (\Delta\Theta_{л1} + \Delta\Theta_{из.л1})\frac{2l_{л1}}{l_{ср1}} =$$

$$= (14 + 3,8)\frac{2\cdot 140}{697} + (13,0 + 6,0)\frac{2\cdot 208,5}{697} = 18,4\ ^\circ C.$$

9.6. Условная поверхность охлаждения двигателя (6.109)

$$S_{дв} = (\pi D_{1н} + 8n_р h_р)(l_1 + 2l_{в1}) = (\pi\cdot 272 + 8\cdot 310)(140 + 2\cdot 66,5) = 9,1\cdot 10^5\ мм^2.$$

По рис. 7.2, *а* при высоте оси вращения 160 мм $n_р h_р$=310 мм.

9.7. Суммарные потери, отводимые в воздух внутри двигателя (6.104),

$$\Sigma P_в = \Sigma P' - (1 - k)(P_{э,п1} + P_м) - 0,9P_{мех} =$$

$$= 1595 - (1 - 0,2)(391 + 264,6) - 0,9\cdot 123 = 960\ Вт,$$

где

$$P_{э,п1} = k_\Theta P_{э1}\frac{2l_1}{l_{ср1}} = 1,07\cdot 909\frac{2\cdot 140}{697} = 391\ Вт;$$

$$\Sigma P' = \Sigma P - (k_\Theta - 1)(P_{э1} + P_{э2}) = 1680 - (1,07 - 1)(909 + 299) = 1595\ Вт.$$

9.8. Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой охлаждающей среды (6.102)

$$\Delta\Theta_в = \Sigma P_в/S_{дв} = \alpha_в = 960/9,1\cdot 10^5\cdot 2,5\cdot 10^{-5} = 42,2\ ^\circ C.$$

По рис. 6.8 при $D_{1н}$=272 мм $\alpha_в$=2,5·10⁻⁵.

9.9. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды (6.110)

$$\Delta\Theta_1 = \Delta\Theta'_1 + \Delta\Theta_в = 18,4 + 42,2 = 60,6\ ^\circ C.$$

Полученное значение превышения температуры не превосходит допустимого значения для класса нагревостойкости F по ГОСТ 183-74 (см. табл. 3.1).

10. Расчет вентиляции (см. § 3.3)

10.1. Наружный диаметр центробежного вентилятора принимаем $D_н$=280 мм.

10.2. Окружная скорость лопаток по наружному диаметру вентилятора (3.6)

$$v_н = \pi D_н n_{ном}/60\cdot 10^3 = \pi\cdot 280\cdot 1476/60\cdot 10^3 = 20,7\ м/с.$$

10.3. Требуемый расход охлаждающего воздуха при способе охлаждения IC0141 (3.5)

$$Q_в = 0,9\cdot 10^{-3}\, m\Sigma P_в \sqrt{n_{ном}\cdot 10^{-3} D_н\cdot 10^{-2}}/\Delta\Theta_в =$$

$$= 0,9\cdot 10^{-3}\cdot 2,5\cdot 960\sqrt{1476\cdot 10^{-3}\cdot 280\cdot 10^{-2}}/42,2 = 0,105\ м^3/с.$$

10.4. Поперечное сечение межлопаточного канала на выходе воздуха (3.7)

$$S_в = 2\cdot 10^6 Q_в/0,45v_н = 2\cdot 10^6\cdot 0,105/0,45\cdot 20,7 = 22,5\cdot 10^3\ мм^2.$$

10.5. Аэродинамическое сопротивление (3.9)

$$Z = 12,3\,(n_{ном}\cdot 10^{-3})^2\,(D_{1н}\cdot 10^{-2})^2/Q_в^2 =$$

$$= 12,3\,(1476\cdot 10^{-3})^2\,(272\cdot 10^{-2})^2/0,105^2 = 18\cdot 10^3\ Па\cdot с^2/м^6.$$

10.6. Окружная скорость лопаток по внутреннему диаметру вентилятора (3.8)

$$v_{вн} = \sqrt{v_н - 1,85ZQ_в^2} = \sqrt{20,7 - 1,85\cdot 18\cdot 10^3\cdot 0,105^2} = 10,2\ м/с.$$

10.7. Внутренний диаметр вентилятора (3.10)

$$D_{вн} = 60\cdot 10^3 v_{вн}/\pi n_{ном} = 60\cdot 10^3\cdot 10,2/\pi\cdot 1476 = 133\ мм.$$

10.8. Число лопаток вентилятора (3.11)

$$N_л = 6D_н/(D_н - D_{вн}) = 6\cdot 280/(280 - 133) = 11.$$

10.9. Площадь одной лопатки вентилятора (3.12)

$$S_л = S_в(D_н - D_{вн})/2\pi D_н = 22,5\cdot 10^3\,(280 - 133)/2\pi\cdot 280 = 1,9\cdot 10^3\ мм^2.$$

Глава седьмая

КОНСТРУИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

7.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

После электромагнитного расчета электрической машины приступают к следующему этапу ее проектирования — конструированию. Конструирование начинается с разработки чертежей общего вида машины (продольного и поперечного разрезов). При этом выполняют некоторые механические расчеты, например расчет вала, подшипников.

В процессе конструирования необходимо учитывать технико-экономические требования к проектируемой машине. На конструкцию влияют исполнение машины по степени защиты, способ охлаждения и способ монтажа (см. гл. 1). Кроме того, необходимо иметь в виду условия эксплуатации машины: климатические воздействия внешней среды (температура, влажность воздуха, высота над уровнем моря, солнечная радиация, дождь, ветер, резкие смены температуры, соляной туман, иней, действие плесневых грибов, содержание в воздухе коррозионно-активных веществ.) Исполнения двигателей для различных климатических районов определены ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70; механические воздействия — вибрации, удары.

Требования к электрическим машинам в части воздействия механических факторов изложены в ГОСТ 16962-71.

Конструирование электрической машины должно осуществляться в неразрывной связи с технологией ее изготовления, с широким применением отраслевых и заводских нормалей на детали и сборочные единицы. В основу конструирования должна быть положена наиболее совершенная имеющаяся конструкция электрической машины. Например, конструирование трехфазных асинхронных двигателей целесообразно вести на базе двигателей серии 4А.

7.2. СТАНИНА

Станина представляет собой остов электрической машины, в котором расположен сердечник статора с обмоткой. Станина воспринимает механическую нагрузку от сердечника статора с обмоткой

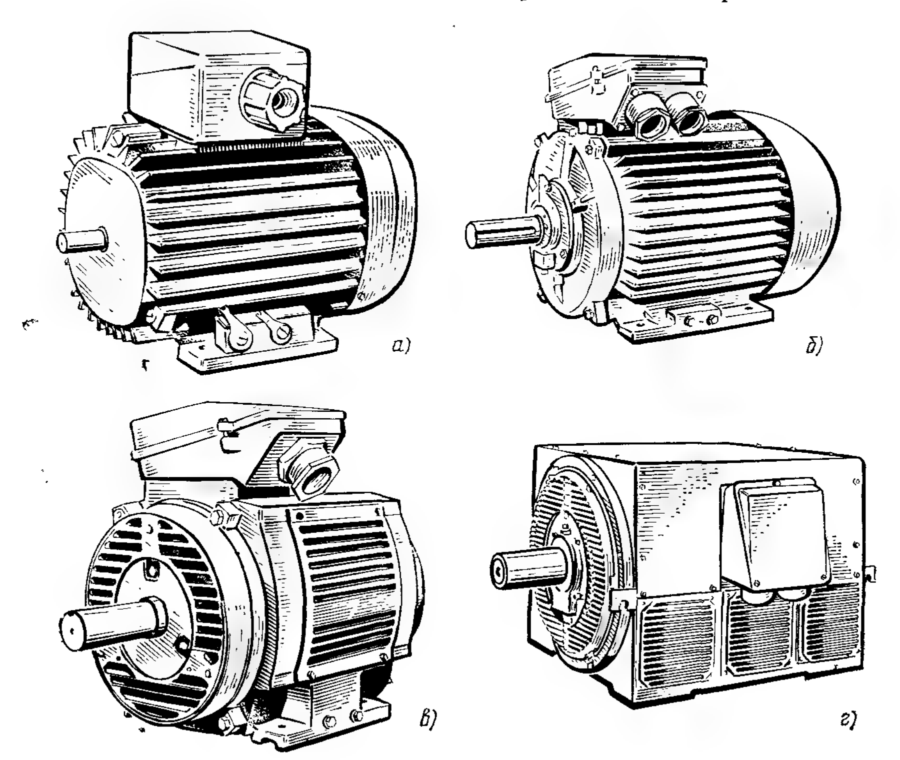


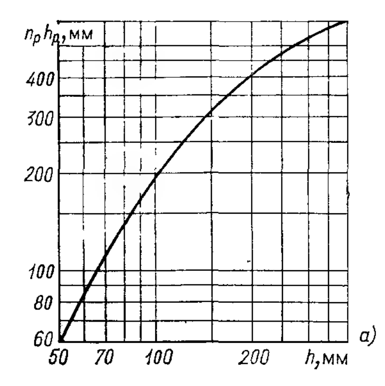
Рис. 7.1. Асинхронные двигатели серии 4А:

а — исполнение IP44 с алюминиевой оболочкой; *б* — исполнение IP44 с чугунной оболочкой; *в* — исполнение IP23 с литой оболочкой; *г* — исполнение IP23 со сварной оболочкой

и от ротора (через подшипниковые щиты), кроме того, станина участвует в процессе теплопередачи от сердечника статора к охлаждающей среде.

Конструкция станины асинхронного двигателя в значительной степени определяется исполнением двигателя по степени защиты.

Станины двигателей со степенью защиты IP44 имеют цилиндрическую форму и снабжены наружными продольными ребрами, увеличивающими поверхность охлаждения (рис. 7.1, *а* и *б*). Необходимое количество ребер $n_р$ и их высоту $h_р$ определяют следующим образом. По рис. 7.2, *а* определяют условную поверхность охлаж-



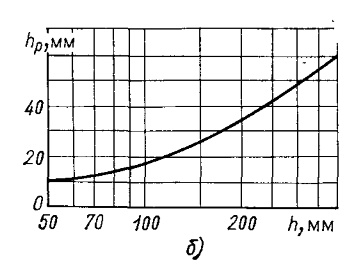


Рис. 7.2. Условная поверхность охлаждения ребристой станины $n_р h_р$ (*а*) и высота ребер $h_р$ (*б*)

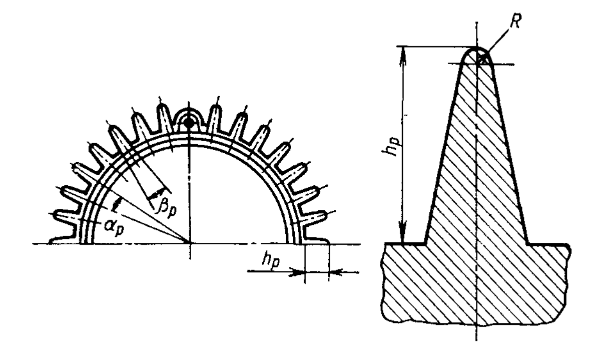


Рис. 7.3. Продольные ребра литых станин асинхронных двигателей исполнения IP44

дения станины на единицу ее длины ($n_р h_р$), представляющую собой произведение числа ребер $n_р$, приходящихся на $^1/_4$ окружности станины, на их высоту $h_р$. Затем по рис. 7.2, *б* определяют высоту ребра $h_р$. Число ребер, приходящихся на 1/4 окружности станины,

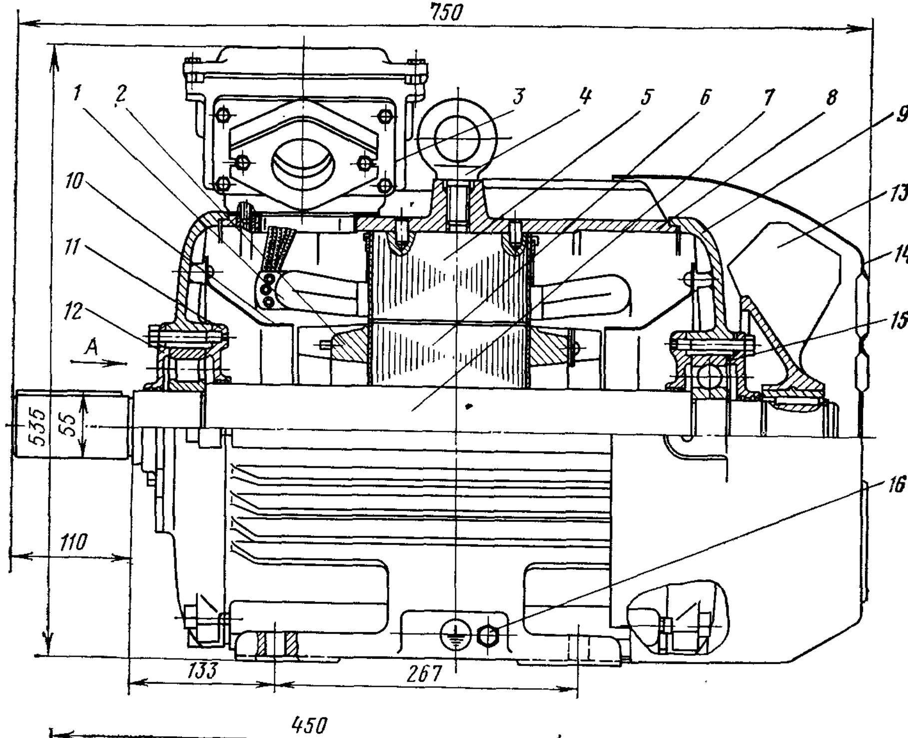
$$n_р = (n_р h_р)/h_р. \qquad (7.1)$$

Угол между двумя соседними ребрами

$$\alpha_р = 90°/n_р. \qquad (7.2)$$

Обозначения размеров ребра даны на рис. 7.3.

Радиус скругления вершины ребра R и угол между стенками ребер $\beta_р$ принимаются в зависимости от высоты оси вращения h по табл. 7.1.



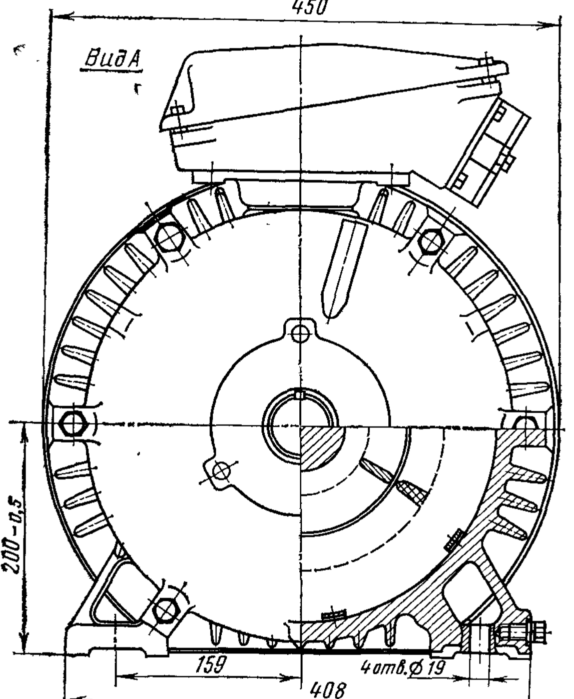


Рис. 7.4. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором исполнения IP44 типа 4А200М2 (37 кВт, 220/380 В, $2p=4$):

1 — обмотка статора; 2 — обмотка ротора; 3 — вводное устройство; 4 — рым-болт; 5 — сердечник статора; 6 — сердечник ротора; 7 — вал; 8 — станина; 9 — щит подшипниковый; 10 — воздухонаправляющий щиток; 11 — крышка подшипниковая внутренняя; 12 — крышка подшипниковая наружная; 13 — вентилятор; 14 — кожух вентилятора; 15 — шайба пружинящая; 16 — болт заземляющий

Таблица 7.1

Наименование	Высота оси вращения h, мм				
	56; 63	71	80—132	160—250	250 и более
Радиус в верхней части, мм	1,0	1,5	1,5	2,5	3,0—4,5
Угол между стенками ребра	3,0°	3,0°	4,0°	4,0°	4,0°

Три или четыре ребра, равномерно расположенных по периметру станины, делают утолщенными. В их торцах сверлят отверстия и нарезают резьбу для крепления подшипниковых щитов болтами.

Станины и подшипниковые щиты асинхронных двигателей исполнения IP44 изготавливаются в зависимости от высоты оси вращения из следующих материалов:

h, мм	Материал станины и подшипниковых щитов
50—63	Алюминиевый сплав
74—160	Алюминиевый сплав или чугун в любом сочетании
180—250	Чугун
280—355	Чугун или сталь

Внутреннюю гладкую поверхность станины двигателей исполнения IP44 обрабатывают под посадку сердечника статора. Получаемое при этом плотное прилегание сердечника статора всей наружной поверхностью к станине способствует более эффективной передаче теплоты от сердечника к станине (рис. 7.4).

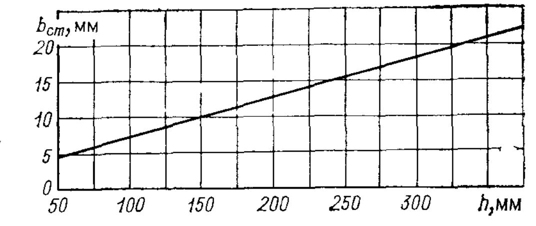
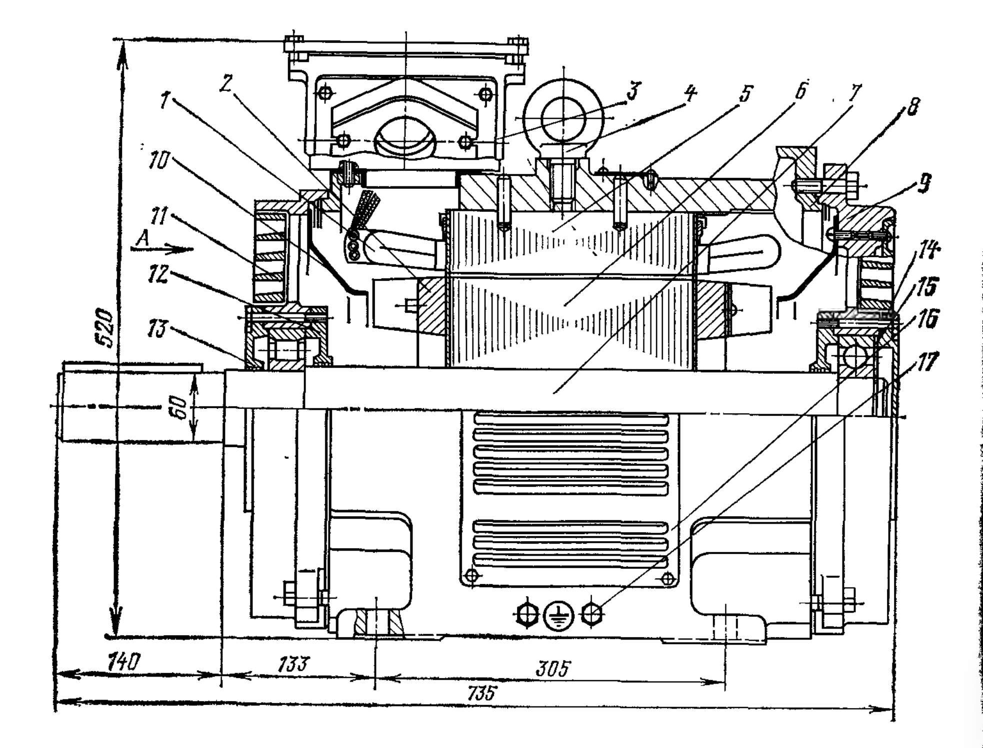


Рис. 7.5. Рекомендуемые средние значения толщины стенки станины

Возможно также изготовление станин асинхронных двигателей методом «облива» сердечника статора алюминиевым сплавом под давлением.

Лапы асинхронных двигателей либо отливаются заодно со станиной, либо изготавливаются отдельно и крепятся к ней.

Станина двигателя должна иметь достаточную жесткость и прочность, что является необходимым условием надежной работы любой электрической машины. При недостаточной жесткости прогиб станины нарушает равномерность зазора между сердечниками статора и ротора. Это наиболее опасно для асинхронных двигателей, так как воздушный зазор у них мал и даже небольшое нарушение его равномерности может вызвать возникновение значительных сил магнитного тяжения. В результате ухудшаются свойства двигателя или даже происходит задевание ротора о статор.



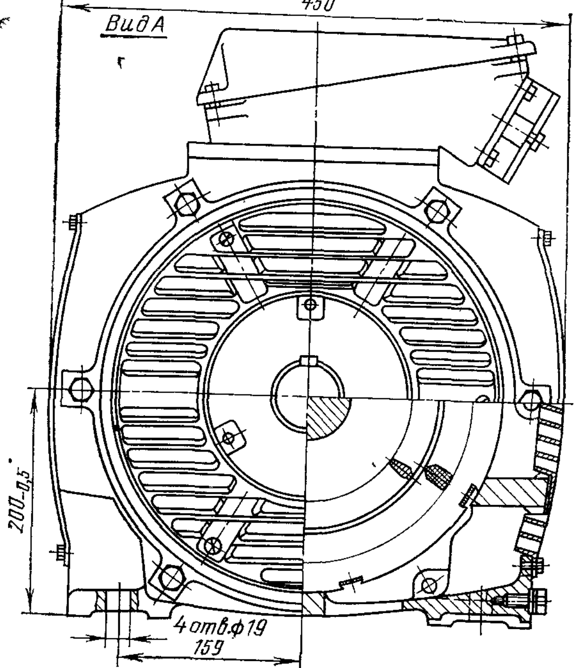


Рис. 7.6. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором исполнения IP23 типа 4АН200L4 (55 кВт, 380/660 В, $2p=4$):

1 — обмотка статора; 2 — обмотка ротора; 3 — вводное устройство; 4 — рым-болт; 5 — сердечник статора; 6 — сердечник ротора; 7 — вал; 8 — станина; 9 — щит подшипниковый; 10 — воздухонаправляющий щиток; 11 — жалюзи; 12 — крышка подшипниковая внутренняя; 13, 14 — крышки подшипниковые наружные; 15 — шайба пружинящая; 16 — жалюзи; 17 — болт заземляющий

Деформация станины вызывается силой тяжести сердечника статора с обмоткой и окружными усилиями, созданными вращающим моментом, а также силами одностороннего магнитного тяжения. Допускается суммарный прогиб станины не более 5 % воздушного зазора.

Толщина стенки станины в двигателях исполнения IP44, обеспечивающая необходимую жесткость, может быть принята [1]: при литье в земляные формы — по кривой $b_{ст}=f(h)$ (рис. 7.5); при литье чугуна в металлические кокили толщина стенки может быть принята на 30—40 % меньше, чем при литье в земляные формы; при обливе сердечника статора алюминиевым сплавом под давлением толщина стенки может быть принята на 50 % меньше, чем при литье в земляные формы по данным рис. 7.5.

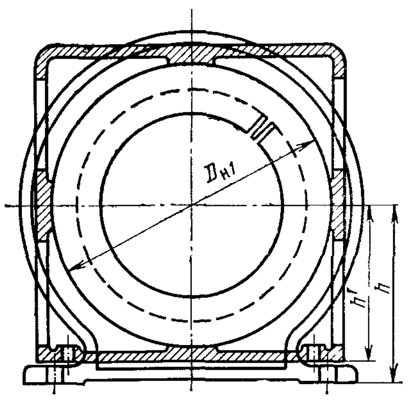


Рис. 7.7. Сравнение станин круглой и прямоугольной формы

В асинхронных двигателях исполнения IP23 сердечник статора укрепляют в станине на опорных ребрах. При этом между внутренней поверхностью станины и наружной поверхностью сердечника статора образуются вентиляционные каналы, способствующие более эффективному охлаждению машины (рис. 7.6). Наличие опорных ребер повышает жесткость станины, что позволяет принять стенки станины несколько тоньше, чем указано на рис. 7.5.

Асинхронные двигатели с высотой оси вращения $h \geqslant 280$ мм исполнения по степени защиты IP23 целесообразно выполнять со станиной, имеющей прямоугольные очертания. Такая станина обеспечивает лучшее использование внутреннего объема машины, т. е. при заданном наружном диаметре сердечника статора получаем машину с меньшей высотой оси вращения (рис. 7.7), чем при станине круглой формы ($h' < h$). При этом незаполненные угловые объемы станины используются для прохождения охлаждающего воздуха.

Станины двигателей исполнения IP23 имеют обычно гладкую внешнюю поверхность (см. рис. 7.1, *в*) и внутренние продольные ребра, обработанные под посадку сердечника статора. В станине имеются отверстия (окна), закрытые жалюзи для выхода охлаждающего воздуха. Жалюзи делают штампованными из листовой стали либо отливают из алюминиевого сплава.

Для размещения вводного устройства на станине имеются специальные основания, выполненные в процессе отливки или же приваренные, а в самой станине имеются окна, через которые проходят выводные концы обмотки. На торцах станины делают заточки для посадки и центрирования подшипниковых щитов. При $h \leqslant$

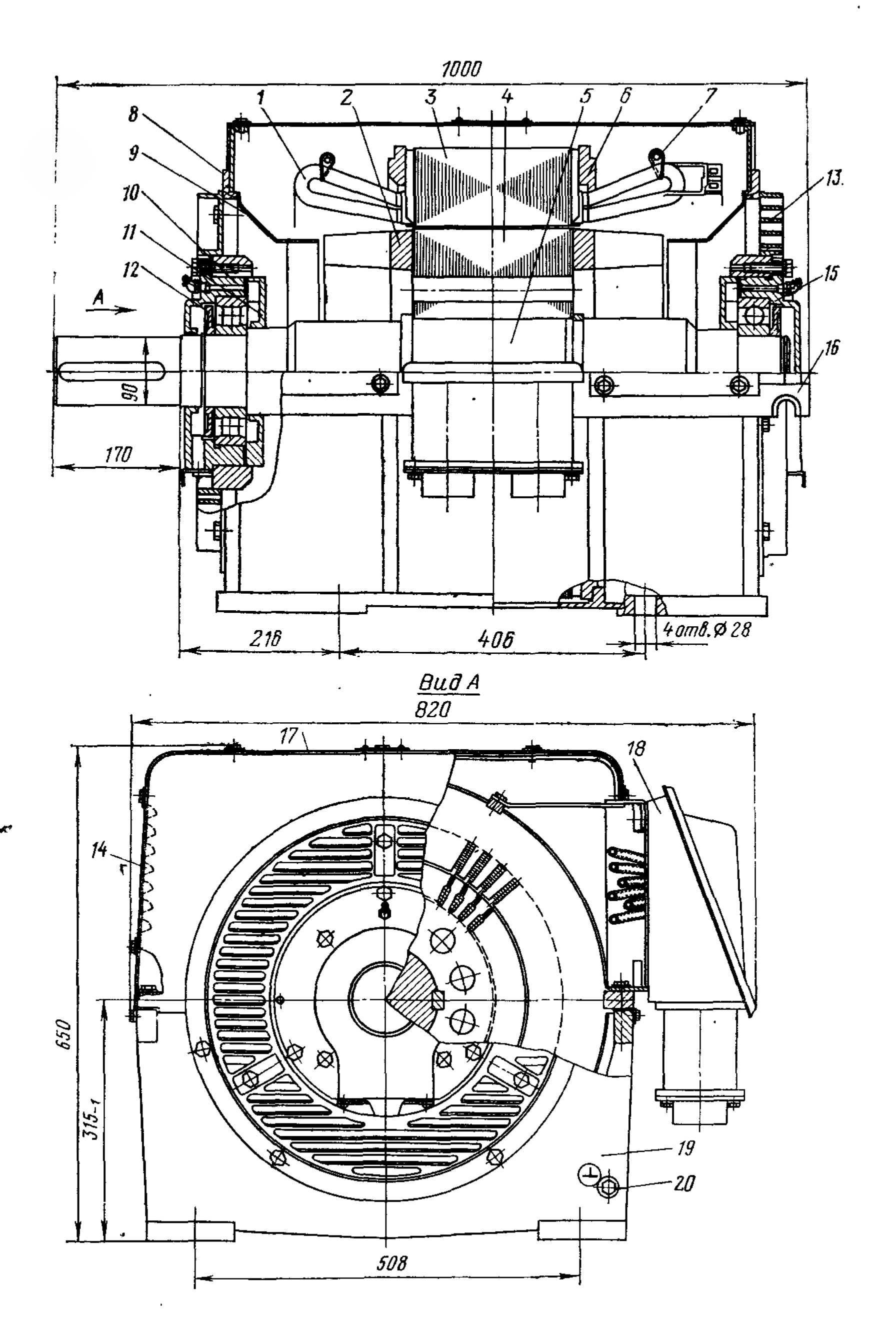


Рис. 7.8. Трехфазный асннхронный двигатель с короткозамкнутым ротором исполиения IP23 типа 4АН315S4 (200 кВт, 380/660 В, $2p=4$):

1 — обмотка статора; *2* — обмотка ротора; *3* — сердечник статора; *4* — сердечиик ротора; *5* — вал; *6* — шайба нажимиая; *7* — кольцо баидажиое; *8* — щит подшипииковый; *9* — воздухоиаправляющий щиток; *10, 15* — капсулы подшипиика; *11* — крышка подшипииковая виутренняя; *12* — шайба для сброса отработаииой смазки; *13* и *14* — жалюзи; *16* — крюк подъемиый; *17* — кожух; *18* — вводное устройство; *19* — полустанииа; *20* — болт заземляющий

$\leqslant$250 мм посадочная поверхность заточки статора обычно внешняя, а при $h \geqslant 280$ мм — внутреиняя.

При массе двигателя 30 кг и более предусматривают один или два рым-болта, облегчающие подъем двигателей при их транспортировке и монтаже (рис. 7.7). В некоторых конструкциях двигателей для этой цели применяют проушины, приваренные к станине.

Двигатели имеют зажимы для заземления, снабженные элементами, предотвращающими самоотвинчивание. Один из этих зажимов располагают во вводном устройстве и один или два — на станине или подшипниковом щите.

Двигатели исполнения по степени защиты IP23 с высотами оси вращения $h=280 \div 355$ мм имеют сварную полустанину, охватывающую только нижнюю половину сердечника статора. Такая конструкция двигателя с короткозамкнутым ротором показана иа рис. 7.8, а двигателя с фазным ротором — на рис. 7.9. Полустанина состоит из четырех стальных стоек, соединенных в основании продольными планками, а в верхней части — двумя ребрами из толстолистовой стали. Стойки полустанины имеют кольцевые заточки. В заточках двух наружных стоек крепятся подшипниковые щиты, а в заточках двух средних стоек — сердечник статора с обмоткой.

Полустанина и верхняя часть двигателя закрыты кожухом из листовой стали. На боковых поверхностях этого кожуха сделаны жалюзи для выхода охлаждающего воздуха. Для удобства транспортировки в двигателях рассмотренной конструкции предусмотрены четыре крюка — по два с каждой торцевой стороны. Такая конструкция станины дает возможность существенно уменьшить общую массу двигателя, а коробчатая форма станины позволяет улучшить его охлаждение вследствие увеличения объема внутренней полости станины. Укладка обмотки в сердечнике статора и ее пропитка при такой конструкции двигателя производятся до установки сердечника в станине. В двигателях такой конструкции значительно упрощаются уход и профилактические осмотры, так как для осмотра внутренней полости двигателя достаточно снять кожух, не нарушая монтажа и центровки статора и ротора.

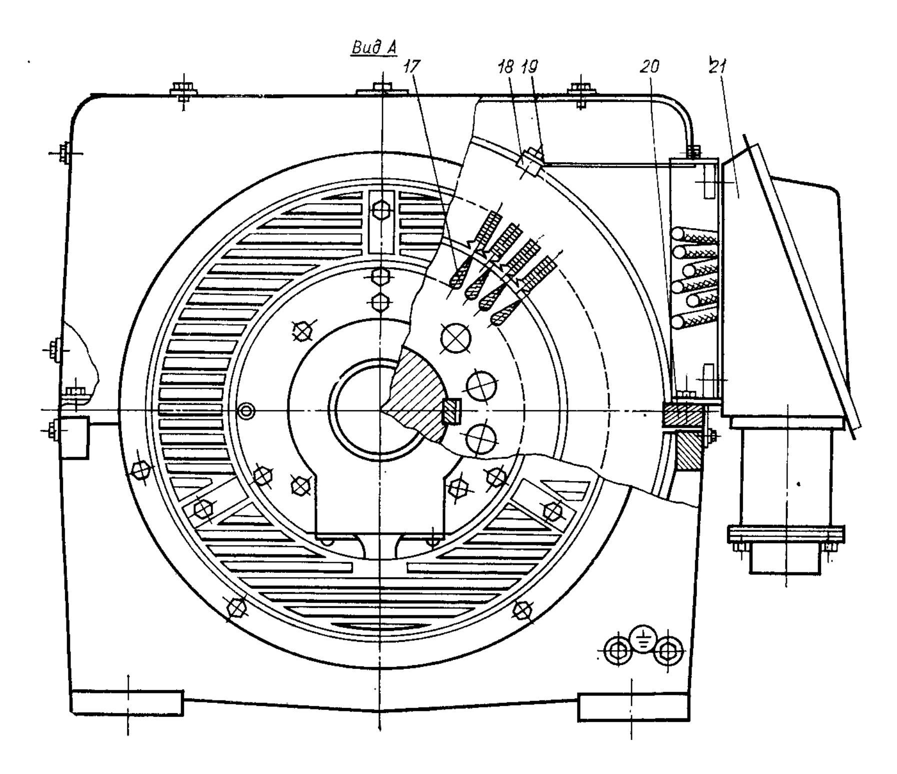
На наружной поверхности станины крепят табличку из некоррозионного материала с приведенными на ней основными техническими данными по ГОСТ 183-74.

7.3. СЕРДЕЧНИКИ СТАТОРА И РОТОРА

Сердечник статора имеет шихтованную конструкцию, т. е. состоит из предварительно отштампованных и изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Для предотвращения «распушения» сердечника крайние листы штампуют из стали толщиной 1,0 мм или же их выполняют посредством точечной сварки попарно из листов толщиной 0,5 мм. В случае применения электротехнической стали марки 2013 листы после штамповки подвергают термической обработке для придания им требуемых магнитных свойств и оксидированию.

Рис. 7.9. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором исполнения IP23 типа 4АНК315S4 (200 кВт, 380/660 В, $2p=4$):

1 — полустанина; *2* — подшипник; *3* — шайба для сброса отработанной смазки; *4* — пружинное кольцо; *5* — вал; *6* — сердечник ротора; *7* — крышка подшипника внутренняя; *8* — масленка; *9* — жалюзи; *10, 16* — подшипниковые щиты; *11* — кожух; *12* — шайба нажимная; *13* — сердечник статора; *14* — обмотка статора; *15* — подшипник; *17* — обмотка ротора; *18* — планка сердечника статора; *19* — болт крепления рамки коробки выводов статора; *20* — продольная планка крепления сердечника статора; *21* — вводное устройство статора; *22* — обмоткодержатель ротора; *23* — коробка контактных колец; *24* — щеткодержатель



Листы сердечников статоров двигателей с высотами осей вращения $h \leqslant 250$ мм набирают на оправку по внутреннему диаметру. При сборке листов их ориентируют по шихтовочному знаку (полукруглой лунке). Если все листы в пакете совпадают по шихтовочному знаку, то значит все они собраны в пакет одной стороной и возможные неточности при штамповке листов не вызвали уменьшения размеров паза в свету.

Набранный пакет сердечника спрессовывают и без снятия давления пресса скрепляют специальными скобами, располагаемыми по наружной поверхности сердечника в канавках, имеющих форму ласточкина хвоста (см. рис. 7.4 и 7.6). Концы скоб загибают, и сердечник оказывается надежно скрепленным. Для сердечников статоров двигателей с высотами осей вращения $h = 50 \div 180$ мм более технологична сварка пакета сердечника несколькими продольными швами по его наружной поверхности.

Сердечники статоров двигателей с высотами осей вращения $h \leqslant 250$ мм протачивают по наружному диаметру. Обработанные таким образом поверхности сердечников обеспечивают лучший тепловой контакт их со станиной.

Соединение сердечника статора со станиной осуществляется одним из следующих способов. В двигателях малых габаритов с алюминиевой станиной сердечник статора «обливается» алюминием. Если же станина чугунная, то при $h \leqslant 250$ мм обмотанный и пропитанный сердечник статора впрессовывают в станину. При этом в станине предусмотрена «заходная» часть, обработанная по несколько большему диаметру по сравнению с посадочной частью.

Сердечники статоров двигателей с $h \geqslant 280$ мм набирают из лакированных листов (предварительно с листов снимают заусенцы, образовавшиеся при штамповке). При этом листы либо набирают непосредственно в станину и в процессе опрессовки закрепляют кольцевыми или поперечными шпонками (двигатели со степенью защиты IP44), либо набирают на оправку по внутреннему диаметру вне станины и скрепляют стальными планками, заложенными в неглубоких канавках и приваренными к нажимным шайбам и частично к спинке сердечника статора (двигатели со степенью защиты IP23).

В двигателях исполнения по степени защиты IP23 с высотами осей вращения $h = 280 \div 355$ мм (см. рис. 7.8 и 7.9) к сердечнику статора приваривают по бокам две стальные пластины. Этими пластинами сердечник опирается на края полустанины и крепится к ней болтами.

Сердечники роторов асинхронных двигателей шихтуют из листов, отштампованных из высечки листов статоров. Если применяется электротехническая сталь марки 2013, то после штамповки листы подвергают термической обработке для получения необходимых магнитных свойств и оксидированию для получения на поверхности листов тонкой оксидной пленки в пазах и между зубцами. Оксидная пленка изолирует стержни короткозамкнутого ротора от сердечника, а также листы сердечника ротора друг от друга, что способствует уменьшению потерь в двигателе.

Листы короткозамкнутых роторов набирают на оправку по внутренней вырубке листов. При этом следят за совпадением шихтовочного знака. Набранный на оправку и опрессованный пакет ротора поступает на заливку алюминием. Затем пакеты снимают с оправки и напрессовывают на вал. В двигателях с $h \leqslant 250$ мм пакет ротора напрессовывают на вал без шпонки с предварительным нагревом до температуры 400—500 °С, а в двигателях с $h \geqslant 280$ мм пакет ротора напрессовывают на вал со шпонкой (см. рис. 7.8 и 7.9).

Сердечники роторов протачивают до необходимого размера по наружному диаметру. При этом в целях уменьшения замыкания между листами ротора и выступающим в шлицах полузакрытых пазов алюминием целесообразна механическая обработка ротора ротационным резанием — свободно вращающимся резцом с круговой режущей кромкой.

В случае фазного ротора листы собирают в пакет сердечника непосредственно на валу, имеющем с одной стороны упорный заплечик, а с другой — канавку для кольцевой шпонки (см. рис. 7.9), запирающей сердечник на валу после опрессовки. Сердечник ротора сжимается двумя нажимными шайбами. Имеющиеся на этих шайбах приливы служат обмоткодержателями.

7.4. ВАЛ

Вал электрической машины несет на себе вращающуюся часть — сердечник ротора с обмоткой и другими элементами (обмоткодержателями, контактными кольцами). При этом вал работающей электрической машины испытывает действие вращающего (крутящего) момента, а также действие изгибающего момента, вызванного силой реакции механической передачи. Эта реакция наиболее значительна при ременных и зубчатых передачах. Кроме того, в машинах горизонтального исполнения вал испытывает изгибающие усилия от силы тяжести расположенных на нем сборочных единиц (сердечника с обмоткой, коллектора и т. п.). И, наконец, вал любой электрической машины испытывает изгибающие усилия от сил одностороннего магнитного тяжения, действующих на сердечник ротора при неравномерном воздушном зазоре. Для обеспечения надежной работы электрической машины вал должен быть достаточно прочным во всех своих сечениях, чтобы без появления остаточных деформаций выдерживать все нагрузки, возможные при эксплуатации машины.

Кроме того, вал должен иметь достаточную жесткость, чтобы прогибы вала при работе машины не достигали значений, при которых возможны значительные искажения равномерности воздушного зазора между статором и ротором (якорем).

Расчет вала возможен лишь после конструирования машины, когда известны длина вала и размеры всех его частей. Поэтому

сначала диаметр вала в месте посадки сердечника $b_5 = D_{2вн}$ определяют ориентировочно. Например, для асинхронных двигателей его определяют по соотношению (5.7). А после определения всех размеров вала производят окончательный его расчет на жесткость и прочность и в случае необходимости вносят изменения в предварительно принятый размер $D_{2вн}$.

Конструкция вала асинхронных двигателей единой серии с различными высотами оси вращения показана на рис. 7.4, 7.6, 7.8, 7.9.

В целях повышения технологичности валы двигателей с высо-

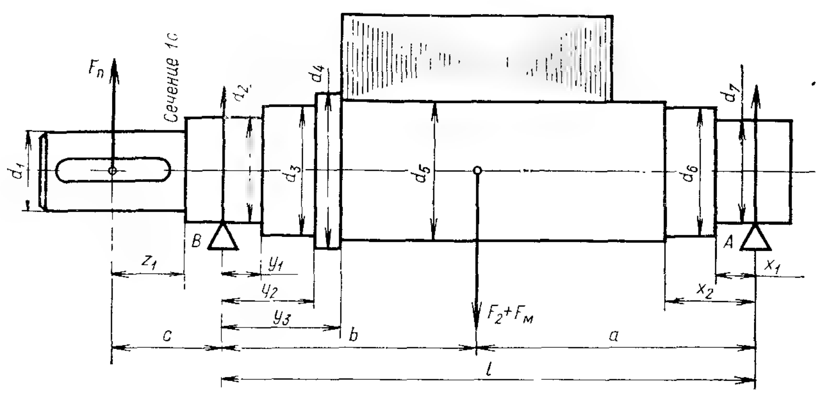


Рис. 7.10. К расчету вала

тами оси вращения $h \leqslant 250$ мм выполняют с минимальным числом ступеней (см. рис. 7.4, 7.6). Вал двигателей с $h \geqslant 280$ мм делают многоступенчатым (рис. 7.10) с упорным заплечиком для осевой фиксации пакета ротора. В двигателях с фазным ротором в конце вала со стороны расположения контактных колец просверливают центральное отверстие для размещения проводов, соединяющих обмотку ротора с контактными кольцами (см. рис. 7.9).

При конструировании вала электрической машины следует руководствоваться рекомендациями приложения П.4 по выбору диаметра d_1 и длины l_1 выступающего конца вала по наибольшему значению вращающего момента.

Расчет вала на жесткость. Расчет вала на жесткость состоит в определении результирующего прогиба вала посредине сердечника ротора, мм,

$$f = f_т + f_п + f_м, \tag{7.3}$$

где $f_т$ — прогиб вала от силы тяжести; $f_п$ — прогиб вала от реакции передачи; $f_м$ — прогиб вала от силы магнитного тяжения.

Результирующий прогиб вала f у асинхронных двигателей не должен превышать, мм,

$$f \leqslant 0{,}12\delta, \tag{7.4}$$

где δ — односторонний воздушный зазор между статором и ротором, мм.

Таблица 7.2

Участок b (рис. 7.10)								
d_i, мм	J_i, мм^4	y_i, мм	y_i^3, мм^3	$y_i^3 - y_{i-1}^3$, мм^3	$\frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}$, мм$^{-1}$	y_i^2, мм^2	$y_i^2 - y_{i-1}^2$, мм^2	$\frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}$, мм$^{-2}$
$S_b = \Sigma \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}$, мм$^{-1}$						$S_0 = \Sigma \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}$, мм$^{-2}$		

Участок a (рис. 7.10)					
d_i, мм	J_i, мм^4	x_i, мм	x_i^3, мм^3	$x_i - x_{i-1}^3$, мм^3	$\frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}$, мм$^{-1}$

$$S_a = \Sigma \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}, \text{ мм}^{-1}$$

В исключительных случаях допускается $f = 0{,}15\,\delta$. Если же условие (7.4) не выполняется, то диаметр d_5 следует увеличить и расчет повторить.

Для определения жесткости вала с учетом его ступенчатой формы необходимо разбить вал на участки (рис. 7.10) и составить таблицу, по форме соответствующую табл. 7.2.

Прогиб вала посредине сердечника ротора под действием силы тяжести, мм,

$$f_т = \frac{F_2}{3El^2}(a^2 S_b + b^2 S_a) \cdot 10^6, \tag{7.5}$$

где F_2 — сила тяжести (вес) сердечника ротора с обмоткой и участком вала по длине сердечника, Н; E — модуль упругости материала вала, Па (для стали марки 45 $E = 2{,}06 \cdot 10^{11}$ Па); a, b и l — участки вала по рис. 7.10, мм.

Значения S_a и S_b определяют по табл. 7.3, при этом момент инерции, мм^4,

$$J_i = \pi d_i^4 / 64, \tag{7.6}$$

где d_i — диаметр рассматриваемого участка вала, мм.

В табл. 7.2 приводятся значения y_i, x_i, представляющие собой расстояния от соответствующей опоры до рассматриваемого сечения вала (рис. 7.10).

Силу тяжести сердечника ротора и участка вала по длине сердечника F_2 определяют приближенно, принимая объем этих эле-

ментов однородным, имеющим удельную силу тяжести 71,6 Н/мм³ для ротора с короткозамкнутой алюминиевой клеткой или 78,5 Н/мм³ для фазного ротора. Таким образом, сила тяжести, Н, для короткозамкнутого ротора

$$F_2 = 56 l_2 (D_2^2 - d_{к,а}^2\, n_{к,а}) \cdot 10^{-6}; \qquad (7.7)$$

для фазного ротора

$$F_2 = 62 l_2 (D_2^2 - d_{к,а}^2\, n_{к,а}) \cdot 10^{-6}; \qquad (7.8)$$

здесь D_2— наружный диаметр ротора, мм; l_2— длина сердечника ротора без радиальных вентиляционных каналов, мм; $d_{k,a}$ и $n_{k,a}$ — диаметр, мм, и количество аксиальных вентиляционных каналов.

При отсутствии аксиальных вентиляционных каналов второе слагаемое выражения в скобках в формулах (7.7) и (7.8) равно нулю.

Прогиб вала посредине сердечника ротора от реакции передачи

$$f_п = \frac{F_п c}{3El^2}\,[(1{,}5 l S_0 - S_в)\, a + b S_а] \cdot 10^6, \qquad (7.9)$$

где S_0 определяют, заполняя табл. 7.3; c — участок вала по рис. 7.10.

Реакция передачи, Н,

$$F_п = k_п M_{ном} \cdot 10^3 / r; \qquad (7.10)$$

здесь $M_{ном}$ — номинальный вращающий момент, Н·м;

$$M_{ном} = 9{,}55 \cdot 10^3\, P_{ном}/n_{ном}; \qquad (7.11)$$

$P_{ном}$ — номинальная мощность двигателя, кВт; $n_{ном}$ — номинальная частота вращения, об/мин; r — радиус делительной окружности шестерни, окружности кулачков муфты или окружности шкива, мм; $k_п$ — коэффициент, учитывающий вид передачи: плоским ремнем $k_п = 3$; клиновым ремнем $k_п = 1{,}8$; упругой кулачковой муфтой $k_п = 0{,}3$; шестерней $k_п = 1{,}05$.

Размеры клиноременных шкивов и упругих муфт выбирают по приложениям П.5 и П.6.

Для двигателей с $h \leqslant 250$ мм, у которых вал имеет уступы только в местах посадки подшипников (см. рис. 7.4, 7.6), с достаточной точностью можно принять

$$S_b = (b^3 - y_1^3)/J; \qquad (7.12)$$

$$S_a = (a^3 - x_1^3)/J; \qquad (7.13)$$

$$S_0 = (a^2 - x_1^2)/J, \qquad (7.14)$$

где

$$J = \pi D_{2вн}^4/64. \qquad (7.15)$$

Установившийся прогиб вала от одностороннего магнитного тяжения, мм,

$$f_М = \frac{f_т F_М / F_2}{1 - f_т F_М / F_2 e_0}; \qquad (7.16)$$

здесь e_0 — начальный расчетный эксцентриситет ротора, мм:

$$e_0 = k_e \delta + f_т + f_н; \qquad (7.17)$$

$F_м$ — начальная сила одностороннего магнитного тяжения, Н:

$$F_м = k_F D_2\, l_2\, e_0/\delta. \qquad (7.18)$$

При $\delta \geqslant 0{,}5$ мм $k_e = 0{,}1$; при $\delta < 0{,}5$ мм $k_e = 0{,}15$. При $2p = 2$ $k_F = 0{,}1$; при $2p > 2$ $k_F = 0{,}15$.

Результирующий прогиб вала от силы тяжести ротора, реакции передачи и силы магнитного тяжения определяется по (7.3).

Расчет вала на прочность. Расчет состоит в определении эквивалентного значения напряжения при совместном действии на вал изгибающего $M_и$ и крутящего $M_к$ моментов на участках вала c и b, Па:

$$\sigma_{экв} = \sqrt{M_и^2 + M_к^2}\,\Big/\, d_i^3 \cdot 10^{-10}. \qquad (7.19)$$

Если известно наиболее напряженное сечение вала, то можно ограничиться расчетом на прочность вала только в этом сечении. Однако в любом сечении вала должно соблюдаться условие

$$\sigma_{экв} \leqslant 0{,}7 \sigma_т, \qquad (7.20)$$

где $\sigma_т$ — предел текучести стали, Па.

Например, для стали марки 45 $\sigma_т = 360 \cdot 10^6$ Па, а для стали марки Ст3 $\sigma_т = 240 \cdot 10^6$ Па.

Изгибающий момент в рассматриваемом сечении вала на участке c, Н·м,

$$M_и = (M_{max}/M_{ном})(F_п + F_{шк})\, z_1' \cdot 10^{-3}, \qquad (7.21)$$

где $M_{max}/M_{ном}$ — перегрузочная способность двигателя, обычно принимается из электромагнитного расчета машины; $F_{шк}$ — сила тяжести шкива или полумуфты, Н:

$$F_{шк} = 9{,}81 G_{шк}. \qquad (7.22)$$

Массу шкива или полумуфты $G_{шк}$ определяют по приложению П.5 или П.6.

Отрезки c и z_1 измеряются от середины длины выступающего конца вала (см. рис. 7.10), если передача движения от двигателя к механизму осуществляется посредством шкива. Если же передача движения осуществляется посредством упругой муфты, то c и z_1' отсчитываются от середины кулачков муфты, т. е.

$$z_1' = 0{,}5 (L + l_1), \qquad (7.23)$$

где L и l_1— по приложению П.6.

Для определения момента $M_и$ на участке b необходимо определить реакцию опоры B, H,

$$R_b = \frac{(F_2 + F_М)\, a + F_п (l + c)}{l}. \qquad (7.24)$$

Изгибающий момент в рассматриваемом сечении вала на участке b, Н·м,

$$M_и = [F_п (c + y) + R_в y] \cdot 10^{-3}. \qquad (7.25)$$

Момент кручения, Н·м,

$$M_к = (M_{max}/M_{ном}) M_{ном}. \qquad (7.26)$$

Марку стали для изготовления вала принимают такой, чтобы соблюдалось условие (7.20). В сечениях вала, ослабленных шпоночными канавками, расчет эквивалентного напряжения ведут по диаметру, мм,

$$d_0 = d_i - h_{шп}, \qquad (7.27)$$

где $h_{шп}$ — глубина шпоночного паза, мм.

Для снижения концентрации напряжений в месте перехода от одного диаметра вала к другому не следует применять отношение диаметров соседних ступеней более чем 1,3, а радиус скругления в месте перехода должен быть не менее 0,05 диаметра вала.

Определение критической частоты вращения. Вал электрической машины представляет собой упругую систему, в которой под действием внешних сил возбуждаются колебания. Наиболее тяжелым случаем является резонанс колебаний, когда частота вынужденных колебаний совпадает с частотой собственных колебаний вала, нагруженного ротором (якорем). Такое состояние наступает при критической частоте вращения вала.

Первая критическая частота вращения вала [1] с учетом влияния магнитного притяжения сердечника ротора, об/мин,

$$n_{кр} = 950 \sqrt{\frac{1 - f_т F_м / F_2 e_0}{f_т + f_{шк}}}. \qquad (7.28)$$

Прогиб вала от силы тяжести шкива или полумуфты, мм,

$$f_{шк} = f_п F_{шк}/F_п. \qquad (7.29)$$

Для устойчивой работы вала необходимо, чтобы номинальная частота вращения была меньше критической по крайней мере на 30 %:

$$n_{кр} > 1{,}3 n_{ном}. \qquad (7.30)$$

Пример. Рассчитать вал трехфазного асинхронного двигателя горизонтального исполнения с короткозамкнутым ротором без вентиляционных каналов.

Исходные данные: номинальная мощность двигателя $P_{ном}$=200 кВт; номинальная частота вращения $n_{ном}$=1480 об/мин; наружный диаметр ротора D_2= =380 мм, длина сердечника ротора l_2=255 мм; воздушный зазор δ=1 мм; размеры вала (рис. 7.10), мм; d_1=95; d_2=d_7=100; d_3=114; d_4=125; d_5=110; d_6= =105; z_1=85; c=150; y_1=60; y_2=140; y_3=185; b=420; a=460; l=880; x_1=60; x_2=140; глубина шпоночного паза на выступающем конце вала $h_{шп}$=9 мм.

Передача движения от двигателя к механизму осуществляется посредством кулачковой муфты МУВП1-90, имеющей массу G=80 кГ и размеры L=350 мм, l=75 мм.

Таблица 7.3

Участок b

d_i, мм	J_i, 10^6 мм^4	y_i, мм	y_i^3, 10^6 мм^3	$y_i^3 - y_{i-1}^3$, 10^6 мм^3	$y_i^3 - y_{i-1}^3$, мм$^{-1}$	y_i^2, 10^3 мм^2	$y_i^2 - y_{i-1}^2$, 10^3 мм^2	$\frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}$, 10^{-3}мм$^{-2}$
100	4,90	60	0,216	0,216	0,044	3,60	3,60	0,734
114	5,95	140	2,744	2,528	0,425	19,60	16,00	2,689
125	11,95	185	6,332	3,588	0,300	34,22	14,62	1,223
110	7,20	420	74,088	67,756	9,410	176,4	112,18	15,580
S_b=10,18 мм$^{-1}$						S_0=0,023 мм$^{-2}$		

Участок a

d_i, мм	J_i, 10^6 мм^4	x_i, мм	x_i^3, 10^3 мм^3	$x_i^3 - x_{i-1}^3$, 10^3 мм^3	$\frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}$, мм$^{-1}$
100	4,90	60	216	216	0,044
105	5,95	140	2744	2528	0,425
110	7,20	460	97 336	94 592	13,137

S_a=13,6 мм$^{-1}$

1. Расчет вала на жесткость

1.1. Заполняем форму по табл. 7.2 и определяем значения S_b, S_0, S_a; результаты представлены в табл. 7.3.

1.2. Сила тяжести сердечника ротора с обмоткой и участком вала по длине сердечника (7.7)

$$F_2 = 56 l_2 \left(D_2^2 - d_{к.а}^2 n_{к.а}\right) \cdot 10^{-6} = 56 \cdot 225 \cdot 380^2 \cdot 10^{-6} = 2062 \text{ Н}.$$

1.3. Прогиб вала посредине сердечника ротора под действием силы тяжести F_2 (7.5)

$$f_т = \frac{F_2}{3El^2} (a^2 S_b + b^2 S_a) \cdot 10^6 =$$

$$= \frac{2062}{3 \cdot 2{,}06 \cdot 10^{11} \cdot 880^2} (460^2 \cdot 10{,}18 + 420^2 \cdot 13{,}6) \cdot 10^6 = 0{,}0197 \text{ мм}.$$

1.4. Номинальный вращающий момент (7.11)

$$M_{ном} = 9{,}55 \cdot 10^3 P_{ном}/n_{ном} = 9{,}55 \cdot 10^3 \cdot 200/1480 = 1292 \text{ Н·м}.$$

1.5. Реакция передачи (7.10)

$$F_п = k_п M_{ном} \cdot 10^3 / r = 0{,}3 \cdot 1292 \cdot 10^3/121 = 3200 \text{ Н},$$

где $k_п$=0,3 (табл. 7.4).

1.6. Прогиб вала посредине сердечника ротора от реакции передачи (7.9)

$$f_п = \frac{F_п c}{3El^2} [1{,}5lS_0 - S_b) a + bS_a] 10^6 =$$

$$= \frac{3200 \cdot 150}{3 \cdot 2{,}06 \cdot 10^{11} \cdot 880^2} [(1{,}5 \cdot 880 \cdot 0{,}023 - 10{,}18) \cdot 460 + 420 \cdot 13{,}6] \cdot 10^6 = 0{,}015 \text{ мм}.$$

1.7. Начальный расчетный эксцентриситет ротора (7.17)

$$e_0 = k_e \delta + f_т + f_п = 0{,}1 \cdot 1 + 0{,}0197 + 0{,}0150 = 0{,}135 \text{ мм},$$

где $\kappa_e = 0{,}1$.

1.8. Начальная сила одностороннего магнитного тяжения (7.18)

$$F_м = k_F D_2 l_2 e_0 / \delta = 0{,}15 \cdot 380 \cdot 255 \cdot 0{,}135/1 = 1960 \ H;$$

здесь $k_F = 0{,}15$.

1.9. Прогиб вала под действием силы одностороннего магнитного тяжения (7.16)

$$f_м = \frac{f_т F_м / F_2}{1 - f_т F_м / (F_2 e_0)} = \frac{0{,}0197 \cdot 1960/2056}{1 - 0{,}0197 \cdot 1960/(2056 \cdot 0{,}135)} = 0{,}022 \text{ мм}.$$

1.10. Результирующий прогиб вала посредине сердечника ротора (7.3)

$$f = f_т + f_п + f_м = 0{,}0197 + 0{,}0150 + 0{,}022 = 0{,}057 \text{ мм},$$

т. е. $f = 0{,}057\delta$, следовательно, условие (7.4) выполняется.

2. Расчет вала на прочность

Рассчитаем вал на прочность в наиболее напряженном сечении $1c$ (см. рис. 7.13) с учетом глубины шпоночного паза на выступающем конце вала $h_{шп} = 9$ мм, принимаем $d_0 = 86$ мм.

2.1. Сила тяжести полумуфты (7.22)

$$F_{шк} = 9{,}81 G_{шк} = 9{,}81 \cdot 80 = 785 \ H.$$

2.2 Значение z_1' с учетом размеров полумуфты (7.23)

$$z_1' = 0{,}5L + 0{,}5l_1 = 0{,}5 \cdot 350 + 0{,}5 \cdot 75 = 212 \text{ мм}.$$

2.3. Изгибающий момент в сечении *1—1* участка *c* (7.21).

$$M_и = (M_{max}/M_{ном})(F_п + F_{шк}) z_1' \cdot 10^{-3} = 2(3200 + 785) \cdot 212 \cdot 10^{-3} = 1700 \text{ Н·м},$$

перегрузочную способность двигателя принимаем равной 2.

2.4. Момент кручения (7.26)

$$M_к = (M_{max}/M_{ном}) M_{ном} = 2 \cdot 1292 = 2584 \text{ Н·м}.$$

2.5. Эквивалентное напряжение в сечении $1c$ (7.19)

$$\sigma_{экв} = \sqrt{M_и^2 + M_к^2} / d_i^3 \cdot 10^{-10} = \sqrt{1700^2 + 2584^2} / 81^3 \cdot 10^{-10} = 6{,}2 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Принимаем для изготовления вала сталь марки 45, тогда

$$\sigma_{экв}/\sigma_т = 6{,}2 \cdot 10^6 / 360 \cdot 10^6 = 0{,}017,$$

т. е. условие (7.20) выполняется.

3. Определение критической частоты вращения

3.1. Прогиб вала от силы тяжести полумуфты (7.29)

$$f_{шк} = f_п F_{кш} / F_п = 0{,}015 \cdot 785/3200 = 0{,}0037 \text{ мм}.$$

3.2. Первая критическая частота вращения (7.28)

$$n_{кр} = 950 \sqrt{\frac{1 - f_т F_м / (F_2 e_0)}{f_т + f_{шк}}} = 950 \sqrt{\frac{1 - 0{,}0197 \cdot 1960/(2056 \cdot 0{,}135)}{0{,}0197 + 0{,}0037}} =$$

$$= 5700 \text{ об/мин}.$$

Таким образом, условие (7.30) выполняется:

$$5700 = 1{,}3 \cdot 1480 > 1924 \text{ об/мин}.$$

7.5. ПОДШИПНИКОВЫЕ ЩИТЫ

Для передачи механических усилий от вала к станине служат подшипниковые щиты (см. § 7.4). Материалом для изготовления подшипниковых щитов в асинхронных двигателях является алюминий или чугун (см. с. 143).

Подшипниковые щиты трудно поддаются расчету, поэтому толщина их стенок и конфигурация выбираются из технологических соображений с учетом качества отливок и необходимой жесткости при механической обработке. При этом следует стремиться к меньшей длине щита, выполняя его в форме, близкой к диску. Такая форма щита способствует уменьшению перекоса подшипников, а при исполнении по способу защиты IP44 дает возможность увеличить длину оребренной поверхности станины.

При конструировании щитов следует избегать резких переходов от толстых стенок к тонким, так как в этих местах чаще образуются усадочные раковины.

Подшипниковые щиты двигателей исполнения IP23 имеют в торцевой плоскости отверстия, прикрытые жалюзи, для входа охлаждающего воздуха (см. рис. 7.6 и 7.8). К внутренней поверхности этих щитов крепятся воздухонаправляющие щитки из листовой стали или пластмассы, направляющие охлаждающий воздух на лобовые части обмотки статора. Расстояние от щитков до торцов лопаток ротора должно быть минимально возможным (не более 5—7 мм).

По наружному диаметру подшипниковых щитов делают ушки с отверстиями для болтов, при помощи которых подшипниковые щиты крепятся к станине. Место соединения щита со станиной называют «замком». Различают замки внутренний, если бортик подшипникового щита входит в расточку станины, и наружный, если подшипниковый щит «надевается» на наружную поверхность станины. Предпочтительнее наружное замковое соединение, при котором замковая поверхность щита обрабатывается изнутри, а замковая поверхность станины — снаружи. В этом случае при механической обработке станины исключается возможность повреждения лобовых частей обмотки, а точность обработки посадочных поверхностей подшипникового щита получается более высокой. Достигается это одновременной механической обработкой спаренным режущим инструментом внутренних поверхностей замка и отверстия под подшипник.

Наиболее распространенным дефектом при сборке электрической машины является перекос подшипниковых щитов, который ведет к появлению вибраций и интенсивному износу подшипников. Поэтому целесообразно такое исполнение щитов и станины, при котором ушки щитов и соответствующие им приливы на станине

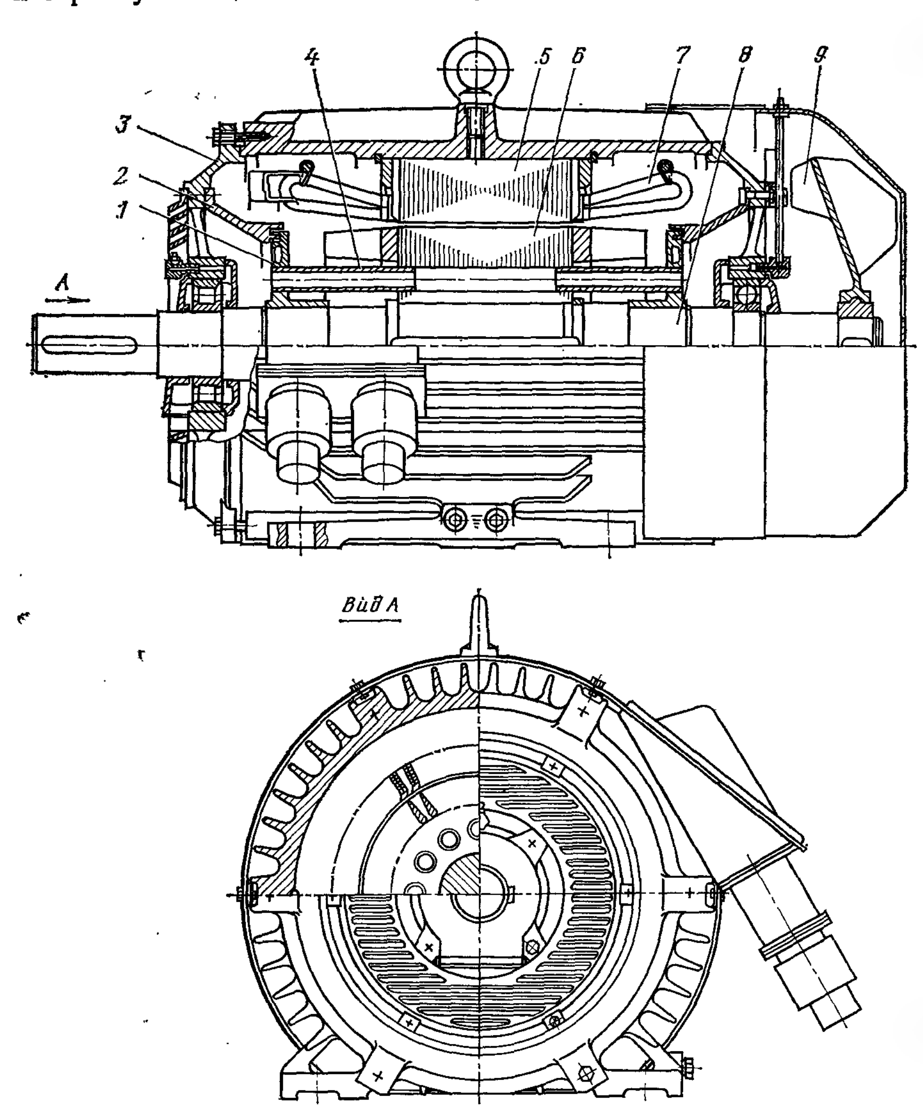


Рис. 7.11. Трехфазный асинхронный двигатель исполнения IP44 с продуваемым ротором:

1 — уплотнительное кольцо; *2* — воздухонаправляющий щиток; *3* — щит подшипниковый; *4* — трубка; *5* — сердечник статора; *6* — сердечник ротора; *7* — обмотка статора; *8* — вал; *9* — малые лопатки вентилятора

при затягивании болтов плотно смыкаются. С этой целью ушки щитов механически обрабатывают заодно с проточкой замка.

Подшипниковые щиты двигателей со степенью защиты IP23 с высотой оси вращения $h=160\div250$ мм (см. рис. 7.6) выполняют в виде ступицы и обода, соединенных между собой шестью ребрами Т-образного сечения, обеспечивающими подшипниковому щиту необходимые жесткость и прочность. В двигателях с высотами оси вращения $h=280\div355$ мм подшипниковые щиты имеют окна для

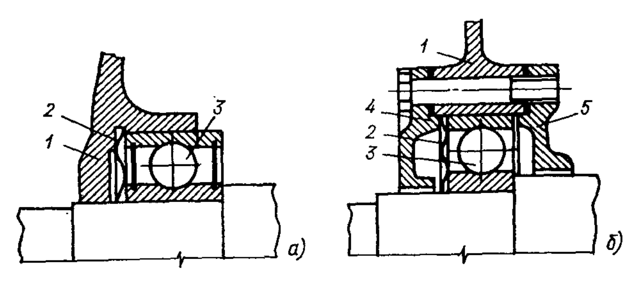


Рис. 7.12. Подшипниковые узлы с несквозным (*а*) и сквозным (*б*) отверстиями для посадки подшипников:

1 — подшипниковый щит; *2* — пружинная шайба; *3* — подшипник; *4* — наружная крышка; *5* — внутренняя крышка

прохода воздуха. В двигателях со степенью защиты IP44 эти окна необходимы для дополнительного охлаждения сердечника ротора наружным воздухом, проходящим по аксиальным вентиляционным каналам в сердечнике ротора (рис. 7.11) под действием малых лопаток центробежного вентилятора наружного обдува.

Подшипниковые щиты двигателей с $h=50\div63$ мм выполняют из алюминиевого сплава с ребрами охлаждения на наружной поверхности, которые при сборке совпадают с ребрами станины.

В центральной части подшипниковых щитов имеются отверстия под подшипник. В щитах из алюминиевого сплава это отверстие армировано стальной втулкой, благодаря чему обеспечиваются постоянство размеров отверстия и возможность многократной разборки подшипникового узла без нарушения посадки подшипника.

В электрических машинах малой и средней мощности преимущественно применяют подшипники качения: шарико- и роликоподшипники.

В асинхронных двигателях с высотой оси вращения $h\leqslant132$ мм отверстие в подшипниковом щите делают несквозным (рис. 7.12, *а*). Подшипниковые крышки в этом случае отсутствуют, а применяемые шарикоподшипники должны иметь уплотнения для предотвращения вытекания смазки из подшипника.

В двигателях с $h\geqslant160$ мм отверстия в щитах под подшипник делают сквозными (рис. 7.12, *б*), а подшипники крепят в щите посредством подшипниковых крышек.

Торцевая часть бортиков подшипниковых крышек служит для предотвращения смещения подшипников в осевом направлении.

Если со стороны выступающего конца вала установлен роликовый подшипник (обычно в двигателях с $h \geqslant 160$ мм), наружные кольца обоих подшипников (роликового и шарикового) зажимаются подшипниковыми крышками, так как роликовый подшипник обеспечивает возможность осевых перемещений вала, компенсируя при сборке двигателя возможные неточности в осевых размерах вала, станины, щитов, а также различие тепловых деформаций перечисленных деталей при нагреве двигателя.

Если же оба подшипника двигателя шариковые (обычно при высоте оси вращения $h < 160$ мм), то для возможности осевого перемещения подшипника под действием теплового удлинения вала

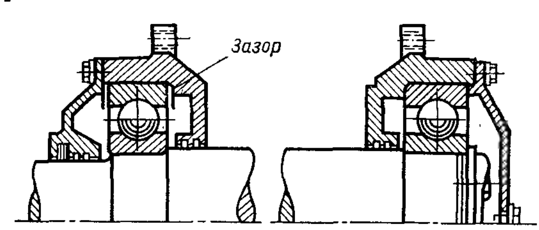


Рис. 7.13. Компенсация осевого перемещения вала в подшипниковом узле

между заточками наружных подшипниковых крышек и наружными кольцами шарикоподшипников закладывают пружинящие шайбы в виде гофрированного стального кольца (рис. 7.12). Наличие указанных колец способствует снижению вибраций двигателя. В менее ответственных случаях один из подшипников закрепляют крышками плотно, а другой устанавливают с некоторым осевым зазором (рис. 7.13).

Внутреннее кольцо подшипника качения насаживается на вал плотно и при разборке двигателя с вала не снимается, а наружное кольцо входит в подшипниковый щит подвижно, что облегчает сборку и разборку двигателя.

Для обеспечения надежной работы подшипников необходима смазка, которая уменьшает трение в подшипниках, предохраняет их от коррозии и препятствует попаданию в них грязи, снижает шумы в подшипниках и способствует отводу теплоты, предохраняя подшипники от чрезмерного перегрева.

Для подшипников качения возможно применение смазок двух видов — жидких и консистентных. Жидкие смазки по сравнению с консистентными имеют меньший коэффициент трения, лучше отводят теплоту, способны проникать в узкие зазоры и вымывать продукты износа подшипников. Однако жидкие смазки требуют применения сложных уплотнительных устройств, предотвращающих вытекание смазок и нуждаются в тщательном уходе за смазочной системой. Поэтому в машинах с подшипниками качения жидкие смазки применяются лишь при больших окружных скоростях (обычно при $dn > 300\,000$, где d — диаметр вала, мм; n — частота вращения, об/мин).

Наибольшее применение для смазки подшипников качения получили консистентные смазки. Они представляют собой высоковязкие мази, получаемые путем загущения минеральных или синтетических масел. Важнейшими свойствами этих смазок являются высокая температура каплепадения, прилипаемость к поверхности трения, стабильность. При температуре нагрева подшипника до 80 °С обычно применяют консистентную смазку марки 1—13.

В современных электрических машинах применяют тугоплавкие консистентные смазки с температурой разжижения 150—200 °С. К ним относятся смазки марок ЦИАТИМ210, ЦИАТИМ202, ЦИАТИМ221 и ЦИАТИМ221с.

Важным элементом подшипникового узла электрических машин является уплотнение, защищающее подшипник от пыли, грязи, металлической стружки, а также препятствующее вытеканию смазки в полость машины. Наибольшее применение в электрических машинах с консистентной смазкой получили уплотнения в виде кольцевых лабиринтных канавок (проточек), выполненных на подшипниковых крышках (рис. 7.14). При сборе подшипниковых узлов лабиринтные канавки и полости крышек заполняют консистентной смазкой. В некоторых конструкциях в одну из кольцевых канавок вставляют войлочное (фетровое) кольцо *4*, внутренняя поверхность которого прижимается к валу.

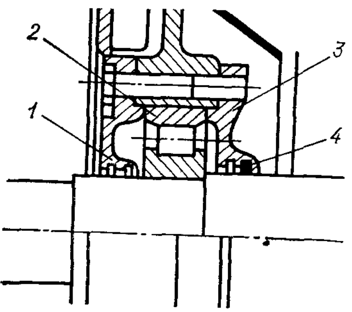


Рис. 7.14. Уплотнение подшипникового узла:

1 — наружная крышка подшипника; *2* — подшипник; *3* — внутренняя крышка подшипника; *4* — войлочное кольцо

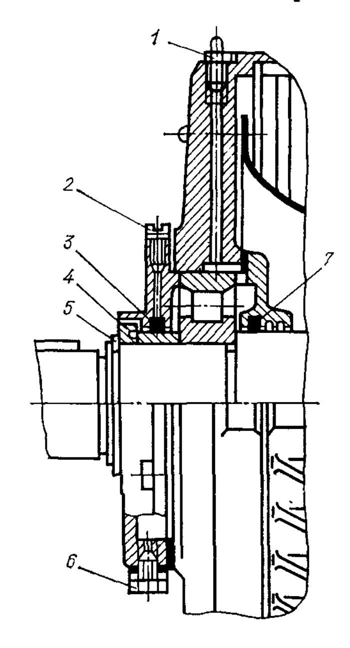


Рис. 7.15. Подшипниковый узел с устройством для пополнения смазки:

1 — масленка; *2* — пробка; *3* — войлочное кольцо; *4* — кольцо уплотнения; *5* — стопорное кольцо; *6* — пробка спускного канала; *7* — войлочное кольцо

В подшипниковых узлах асинхронных двигателей серии 4А с $h \geqslant 160$ мм возможно применение устройства для пополнения смазки без разборки двигателя (рис. 7.15). Свежая смазка под давлением подается через отверстие масленки *1* под внутреннюю крышку подшипника. Отработанная смазка при этом выжимается и удаляется через спускной канал.

7.6. ПОДШИПНИКИ

Все силы, действующие на вал электрической машины, воспринимаются подшипниками.

В электрических машинах с горизонтальным расположением вала основные виды нагрузки на подшипники создаются радиальными силами, действующими перпендикулярно оси вала. Осевые силы в этом случае являются незначительными. Исключение составляют специальные случаи эксплуатации горизонтальных машин, при которых осевые силы значительны, и их необходимо учитывать при выборе подшипников.

В электрических машинах с вертикальным расположением вала основными являются нагрузки, создаваемые осевыми силами. Для восприятия этих сил применяются подпятники. Радиальные нагрузки в этом случае возникают под действием реакции передачи, одностороннего магнитного тяжения ротора к статору, неуравновешенности ротора и некоторых других сил. Для уравновешения радиальных сил в машинах с вертикальным валом помимо подпятника применяют еще и радиальные подшипники, которые в этом случае являются направляющими.

Наибольшее распространение в электрических машинах малой и средней мощности получили подшипники качения — шариковые и роликовые. Подшипники скольжения применяют лишь в крупных электрических машинах, главным образом со стояковыми подшипниками (см. § 9.3).

Подшипники качения по сравнению с подшипниками скольжения имеют следующие преимущества:

незначительный износ, что обеспечивает постоянство воздушного зазора между ротором и статором;

простота обслуживания и небольшой расход смазочных материалов;

малые потери на трение как в процессе работы, так и при пуске машины;

сравнительно небольшие размеры, что обеспечивает компактность подшипниковых узлов.

Подшипники качения, применяемые в электрических машинах, в зависимости от вида основной нагрузки разделяются на радиальные, радиально-упорные и упорные.

Радиальные подшипники применяют главным образом в машинах горизонтального исполнения, где основная нагрузка является радиальной. Однако радиальные подшипники способны воспринимать и некоторую осевую (аксиальную) нагрузку в обе стороны. При этом осевая нагрузка не должна превышать 70 % неиспользованной допустимой радиальной нагрузки. Поэтому в некоторых случаях (в машинах малой мощности) радиальные подшипники качения могут устанавливаться в машинах вертикального исполнения. Или один и тот же двигатель с радиальными подшипниками может использоваться как при горизонтальном, так и при вертикальном положении вала.

Радиальные шарикоподшипники (рис. 7.16) по сравнению с подшипниками других типов имеют меньшие потери на трение и бóльшие допустимые частоты вращения.

Роликоподшипники (рис. 7.17) обладают большей радиальной грузоподъемностью, чем шарикоподшипники тех же размеров. Благодаря разборной конструкции роликоподшипники очень удобны при сборке и эксплуатации электрической машины. Но роликоподшипники очень чувствительны к перекосу колец, поэтому их следует применять в машинах с короткими и толстыми валами.

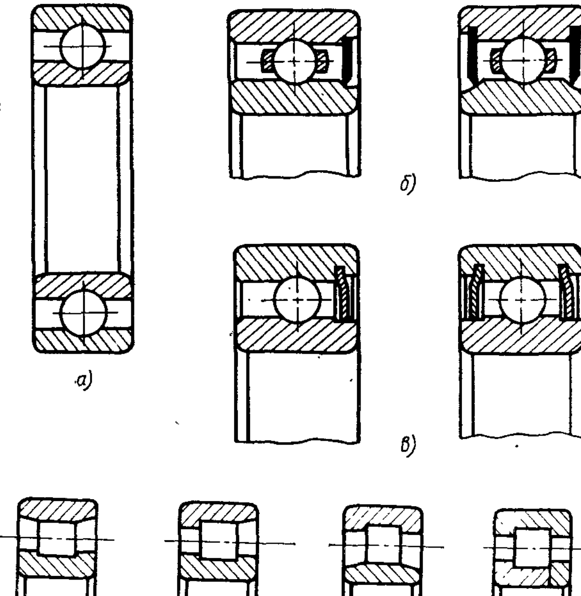


Рис. 7.16. Шариковые радиальные однорядные подшипники:

а — обычные; б — с одним и двумя уплотнениями; в — с одной и двумя защитными шайбами

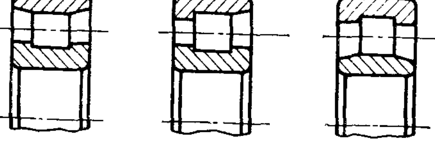


Рис. 7.17. Роликовые радиальные подшипники с короткими цилиндрическими роликами

Радиально-упорные и упорные подшипники (рис. 7.18) применяют в машинах вертикального исполнения, а также в горизонтальных машинах при значительных осевых нагрузках.

Расчет подшипников качения [1] состоит в выборе подшипников, обеспечивающем расчетный срок службы при заданных динамической грузоподъемности и частоте вращения двигателя.

Динамическая приведенная нагрузка однорядного радиального шарикоподшипника, Н,

$$Q = K_н R \text{ при } A/R \leqslant e; \quad (7.31)$$

$$Q = K_н (0{,}56R + YA) \text{ при } A/R > e; \quad (7.32)$$

радиального роликоподшипника с короткими цилиндрическими роликами

$$Q = K_н R; \quad (7.33)$$

радиально-упорного сдвоенного шарикоподшипника

$$Q = K_н (R + 0{,}92A) \text{ при } A/R \leqslant 0{,}68; \qquad (7.34)$$

$$Q = K_н (0{,}67R + 1{,}41\ A) \text{ при } A/R > 0{,}68. \qquad (7.35)$$

В приведенных выражениях $K_н$ — коэффициент, учитывающий характер нагрузки двигателя; для наиболее распространенного режима работы с умеренными толчками и кратковременной перегрузкой до 150 % номинальной нагрузки $K_н = 1{,}5$; A — осевая нагрузка, Н; $У$ — коэффициент приведения осевой нагрузки к радиальной. Значения e и Y однорядного радиального шарикоподшипника в зависимости от отношения осевой нагрузки A к статической грузоподъемности C_0 (см. приложение П.3) определяются по табл. 7.4 [1].

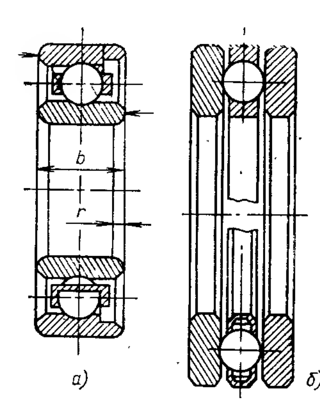


Рис. 7.18. Шариковые радиально-упорный (*а*) и упорный (*б*) подшипники

Если $A/C_0 < 0{,}19$, принимают $Q = R$. Наибольшую радиальную нагрузку R определяют отдельно для подшипников A и B (см. рис. 7.10):

для подшипника A реакция опоры, Н,

$$R_A = (F_2 + F_м)\, b/l + F_п\, c/l; \qquad (7.36)$$

для подшипника B реакцию опоры определяют по (7.24).

Если осевая нагрузка на вал не задана, то в горизонтальных машинах при расчете приведенной нагрузки ее не учитывают, а в вертикальных машинах ее принимают равной, Н,

$$A = F_2 + F_{шк} + 0{,}1R, \qquad (7.37)$$

при этом силу тяжести F_2, рассчитанную по (7.7) или (7.8), увеличивают на 15 %.

Таблица 7.4

A/C_0	0,014	0,028	0,056	0,084	0,11	0,17	0,28	0,42	0,56
e	0,19	0,22	0,26	0,28	0,30	0,34	0,38	0,42	0,44
Y	2,30	1,99	1,71	1,55	1,45	1,31	1,15	1,04	1,00

Примечание. Для промежуточных значений A/C_0 применяют линейную интерполяцию.

По полученному значению динамической приведенной нагрузки Q определяют необходимую динамическую грузоподъемность, Н:

шарикоподшипника

$$C = \frac{Q}{25{,}6} \sqrt[3]{L_h n}; \qquad (7.38)$$

роликоподшипника

$$C = \frac{Q}{18{,}5} (L_h n)^{0{,}3}, \qquad (7.39)$$

где L_h — расчетный срок службы (долговечность) подшипника, ч; n — наибольшая частота вращения двигателя, об/мин.

Затем по приложению П.3 выбирают подшипник соответствующей серии, у которого внутренний диаметр d равен диаметру шейки вала (на рис. 7.10 это d_2 и d_7), а динамическая грузоподъемность не меньше рассчитанного значения.

Пример. Рассчитать подшипники качения для асинхронного двигателя, вал которого рассчитан в примере § 7.6: $F_2 = 2062$ Н; $F_м = 1960$ Н; $F_п = 3200$ Н; $F_{шк} = 785$ Н; $a = 460$ мм; $b = 420$ мм; $c = 150$ мм; $l = 880$ мм, наибольшую частоту вращения ротора принимаем $n = 1500$ об/мин, диаметры шеек вала: $d_2 = 100$ мм и $d_7 = 100$ мм. Осевая нагрузка отсутствует.

Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник A (7.36)

$$R_A = (F_2 + F_м)\, b/l + F_п\, c/l = (2062 + 1960)\, 420/880 + 3200 \cdot 150/880 = 2463 \text{ Н}.$$

Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник B (7.24)

$$R_B = (F_2 + F_м)\, a/l + F_п\, (l + c)/l = (2062 + 1960)\, 460/880 + {}$$
$$+ 3200\, (880 + 150)/880 = 5842 \text{ Н}.$$

Выбираем радиальные подшипники: подшипник A — шариковый, а подшипник B — роликовый; предполагая режим работы подшипников с умеренными толчками, принимаем коэффициент нагрузка $K_н = 1{,}5$. Динамическая приведенная нагрузка:

на шарикоподшипник A (7.31)

$$Q_A = k_н R_A = 1{,}5 \cdot 2463 = 3694 \text{ Н};$$

на роликоподшипник B (7.33)

$$Q_B = k_н R_B = 1{,}5 \cdot 5842 = 8763 \text{ Н}.$$

Принимаем расчетный срок службы подшипников $L_h = 12\,000$ ч, тогда динамическая грузоподъемность:

шарикоподшипника A (7.38)

$$C_B = \frac{Q_A}{25{,}6} \sqrt[3]{L_h n} = \frac{3694}{25{,}6} \sqrt[3]{12\,000 \cdot 1500} = 37\,810 \text{ Н};$$

роликоподшипника B (7.39)

$$C_B = \frac{Q_B}{18{,}5} (L_h n)^{0{,}3} = \frac{8763}{18{,}5} (12\,000 \cdot 1500)^{0{,}3} = 71\,170 \text{ Н}.$$

По табл. П.3.1 с учетом повышенной надежности выбираем шарикоподшипник A средней серии с $d = 100$ мм № 320 с динамической грузоподъемностью $C =$

$=134\,000$ Н; по табл. П.3.2 выбираем роликоподшипник B средней узкой серии с $d=100$ мм № 32320 с динамической грузоподъемностью $C=238\,000$ Н.

7.7. ОБМОТКА СТАТОРА

Типы обмоток статора асинхронных двигателей и рекомендации по их применению приведены в табл. 5.9. Наиболее ответственным при конструировании обмоток является выбор изоляции. При этом следует руководствоваться рекомендациями по конструкции изоляции обмоток статора, приведенными в табл. 5.11—5.14.

В целях повышения коэффициента заполнения паза пазовые коробочки делают однослойными. Предварительно нарезанные полосы листового материала формуют, а затем укладывают в пазы. При этом края коробочек загибают на 180° или же обклеивают полосками прочного материала. Эта мера необходима для усиления механической прочности краев коробочек, выступающих за пределы паза на 4—8 мм и испытывающих значительные механические воздействия при укладке катушек, отгибке и формовке их лобовых частей.

В лобовые части обмотки статора между головками катушек укладывают прокладки из того же листового материала, из которого изготовлены пазовые коробочки. На места паек соединительных проводов к выводным концам катушечных групп обмотки статора надевают изоляционные трубки. В качестве выводных концов обмотки применяют гибкие кабели с изоляцией соответствующего класса нагревостойкости. На лобовые части обмотки накладывают бандажи из стеклошнура.

Обмотанные статоры класса нагревостойкости В подвергают пропитке в лаках без растворителей (капельный или струйный метод). После тепловой обработки лаки надежно скрепляют лобовые и пазовые части обмоток.

В двухслойных всыпных обмотках статора между верхним и нижним слоями обмоток в пазах и лобовых частях располагают прокладки. Из этого же материала выполняют пазовые крышки в случае механизированной укладки обмотки. При ручной укладке применяют пазовые клинья из стеклотекстолита толщиной 2,5 мм или профильного стеклопластика. Между верхним и нижним слоями в лобовых частях устанавливают изоляционные прокладки. Однако эти прокладки не должны перекрывать прямолинейные вылеты катушек, так как воздушные промежутки между этими вылетами играют существенную роль для охлаждения обмотки, особенно в двигателях исполнения IP23.

Обмотку статора асинхронных двигателей с $h \geqslant 280$ мм при напряжении до 660 В выполняют эмалированными проводами прямоугольного сечения. При этом предварительно отформованные полукатушки укладывают в полуоткрытые пазы статора. Предварительно проводники в пазовой и лобовой частях скрепляются специальным обволакивающим покрытием. Пазовые части дополнительно скрепляются либо телефонной бакелизированной бумагой

(класс нагревостойкости B), либо фенилоновой лакированной бумагой (классы нагревостойкости F и H). Пазовые коробочки выступают из пазов статора на 15—20 мм.

На каждую лобовую часть полукатушек в двух-трех местах накладываются бандажи из стеклоленты. Лобовые части в процессе укладки обмотки крепятся стеклочулком к бандажным кольцам (см. рис. 7.8 и 7.9).

7.8. ОБМОТКА РОТОРА

Фазный ротор имеет двухслойную волновую обмотку из медных изолированных стержней прямоугольного поперечного сечения. В пазу располагают по два стержня друг под другом, большей стороной по высоте паза. Каждый стержень имеет заранее отформированную с одной стороны лобовую часть. После того, как такой стержень будет вставлен в паз ротора с торца, формуют его другую

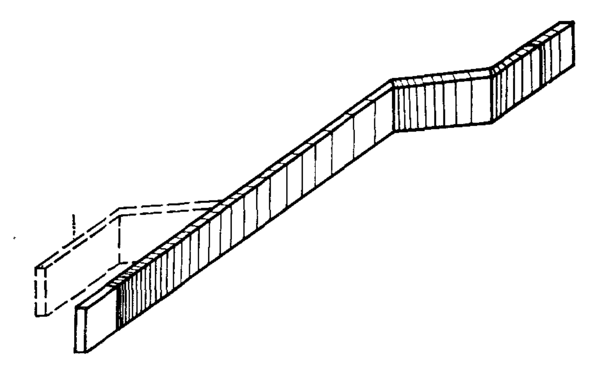


Рис. 7.19. Стержень волновой обмотки

лобовую часть (рис. 7.19). Стержни обмотки соединяются лобовыми частями посредством хомутиков. К хомутикам припаивают вентиляционные лопатки в виде стальных пластин толщиной 0,8 мм (рис. 7.20). Межкатушечные соединения в волновой обмотке ротора отсутствуют.

На лобовые части обмотки ротора накладывают бандаж из стеклянной нетканой ленты, который плотно прижимает лобовые части обмотки к опорной поверхности обмоткодержателей.

Для предотвращения задевания лобовых частей ротора о статор их отгибают к центру ротора на 5—7 мм.

Расчет прочности бандажа состоит в определении необходимого числа витков бандажной ленты $w_б$, обеспечивающего бандажу механическую прочность (см. § 11.2).

Короткозамкнутый ротор асинхронных двигателей с высотой оси вращения $h \leqslant 355$ мм выполняется заливкой спрессованных сердечников алюминием марки А5 (ГОСТ 11069-74). При этом заодно с короткозамыкающими кольцами отливаются вентиляционные ло-

Таблица 7.5

h_1, мм	Число полюсов 2p											
	2			4; 6			8			10—12		
	$N_л$	$l_л$, мм	$h_л$, мм	$N_л$	$l_л$, мм	$h_л$, мм	$N_л$	$l_л$, мм	$h_л$, мм	$N_л$	$l_л$, мм	$h_л$, мм
50—63	6	20	10	6	20	10	—	—	—	—	—	—
71—100	7	35	12	9	30	15	9	30	15	—	—	—
112—160	9	40	20	11	40	22	11	35	25	—	—	—
180	10	60	25	12	60	30	12	50	32	—	—	—
200—250	12	75	28	14	70	35	14	65	40	—	—	—
280, 315	17	95	30	22	90	40	22	82	48	22	80	48
355	19	110	35	22	105	45	22	100	55	22	100	55

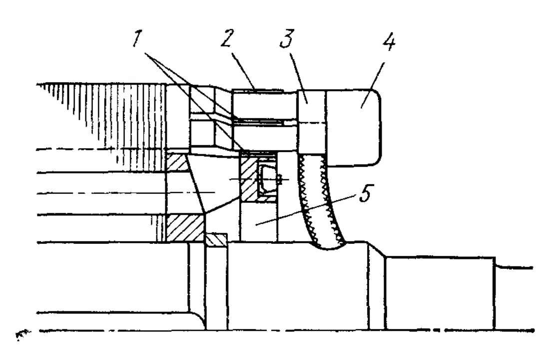


Рис. 7.20. Лобовая часть обмотки фазного ротора:

1 — лента стеклянная; *2* — лента стеклянная бандажная; *3* — хомутик; *4* — вентиляционная лопатка; *5* — обмоткодержатель

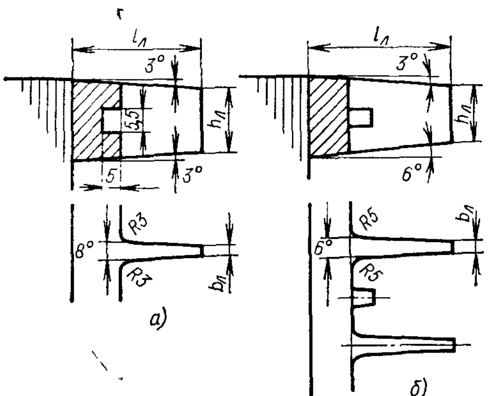


Рис. 7.21. Короткозамыкающие кольца и вентиляционные лопатки ротора:

а — двигателей с $h=50\div132$ мм; *б* — двигателей с $h=160\div355$ мм

патки толщиной $b_л=2\div5$ мм (рис. 7.21), рекомендуемое количество $N_л$ и ориентировочные размеры $l_л$ и $h_л$ которых приведены в табл. 7.5.

Для балансировки ротора на короткозамыкающих кольцах между вентиляционными лопатками располагают либо отверстия ($h<132$ мм), в которые вставляются и зачеканиваются балансировочные грузики, либо штыри ($h\geqslant132$ мм) диаметром 5—10 мм, на которые надеваются балансировочные грузики в виде стальных шайб; затем концы штырей расклепывают.

7.9. УЗЕЛ КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ

Узел контактных колец асинхронных двигателей обычно выносят за пределы подшипникового щита (рис. 7.22). Снаружи узел прикрывают металлическим съемным кожухом, имеющим в торцевой части жалюзи, а в нижней части — отверстия для выхода охлаждающего воздуха. Кожух крепится к торцевой поверхности подшипникового щита. Такая конструкция узла контактных колец позволяет исключить попадание угольно-графитовой пыли во внутреннюю полость двигателя. Кроме того, такое расположение узла обеспечивает свободный доступ к контактным кольцам и щеткам и облегчает уход за ними.

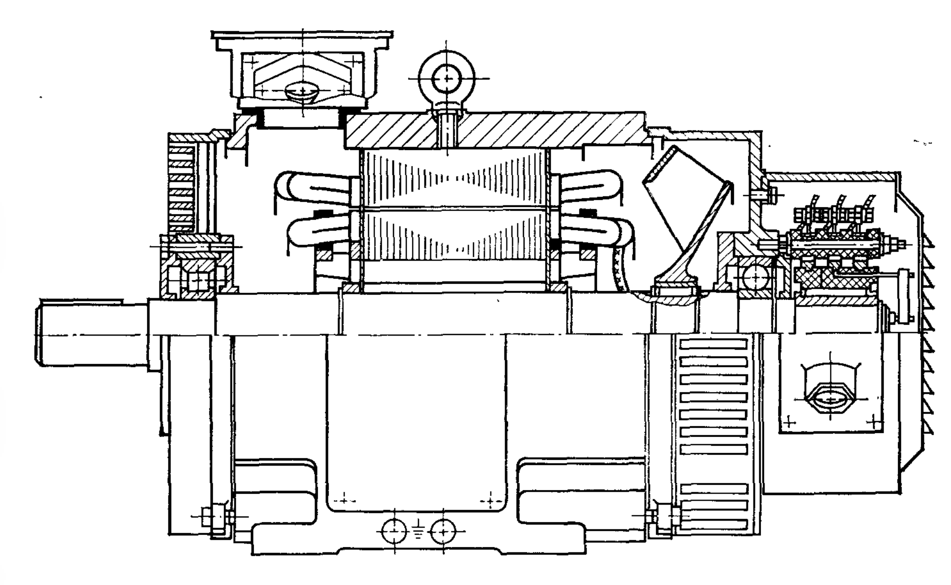


Рис. 7.22. Асинхронный двигатель с фазным ротором 4АНК200, степень защиты IP23

Контактные кольца асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт делают медными, а свыше 100 кВт — стальными или чугунными. Диаметр контактных колец принимают меньше наружного диаметра подшипника. Это обеспечивает возможность снятия подшипникового щита двигателя без предварительного съема контактных колец. Соединение контактных колец с обмоткой ротора осуществляется тремя токоподводами, проходящими через полую часть вала.

Узел контактных колец асинхронных двигателей с фазным ротором при высоте оси вращения до 250 мм (рис. 7.23) состоит из опрессованных пластмассой контактных колец *1*, которые своей пластмассовой частью напрессовываются на выступающую часть вала. На торцах пластмассовой части каждого кольца имеются

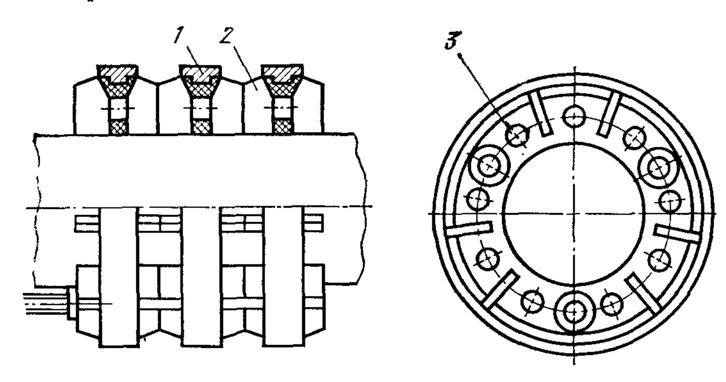


Рис. 7.23. Узел контактных колец асинхронных двигателей с высотой оси вращения до 250 мм

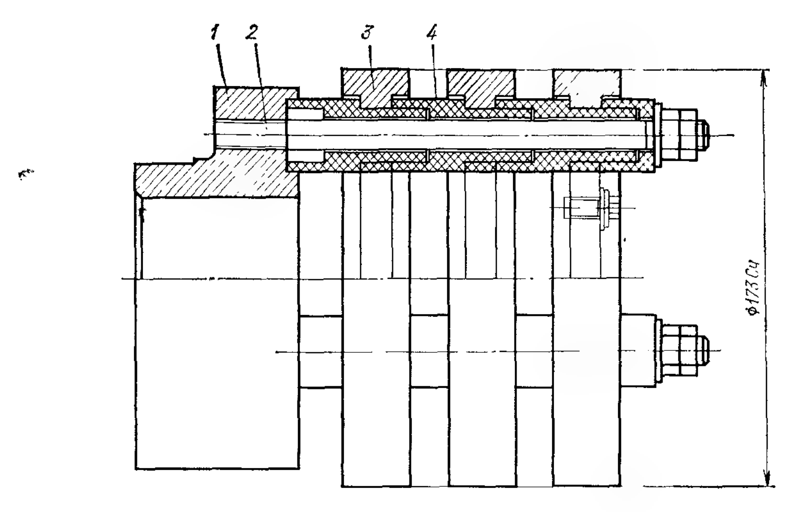


Рис. 7.24. Консольный узел контактных колец:

1 — втулка; *2* — шпилька; *3* — кольцо; *4* — втулка пластмассовая

вентиляционные лопатки *2*, обеспечивающие засасывание охлаждающего воздуха через отверстия *3* в торцевой части колец в пространство между кольцами. Такая конструкция обеспечивает интенсивное охлаждение колец и удаление с поверхности деталей узла угольно-графитовой пыли. В асинхронных двигателях с высотами оси вращения 280, 315 и 355 мм узел контактных колец делают консольным (см. рис. 7.9). Конструкция консольного узла контактных колец показана на рис. 7.24. Кольца *3* крепятся на втулке *1* тремя шпильками *2*. Фиксация колец, а также их электрическая изоляция друг от друга и от шпилек осуществляются пластмассовыми втулками *4*, надеваемыми на шпильки. Для двигателей указанных высот оси вращения контактные кольца унифицированы — их диаметр 173 мм, а ширина 28 мм. Недостаток узла контактных колец консольного типа — повышенная вибрация и как следствие — пониженная надежность.

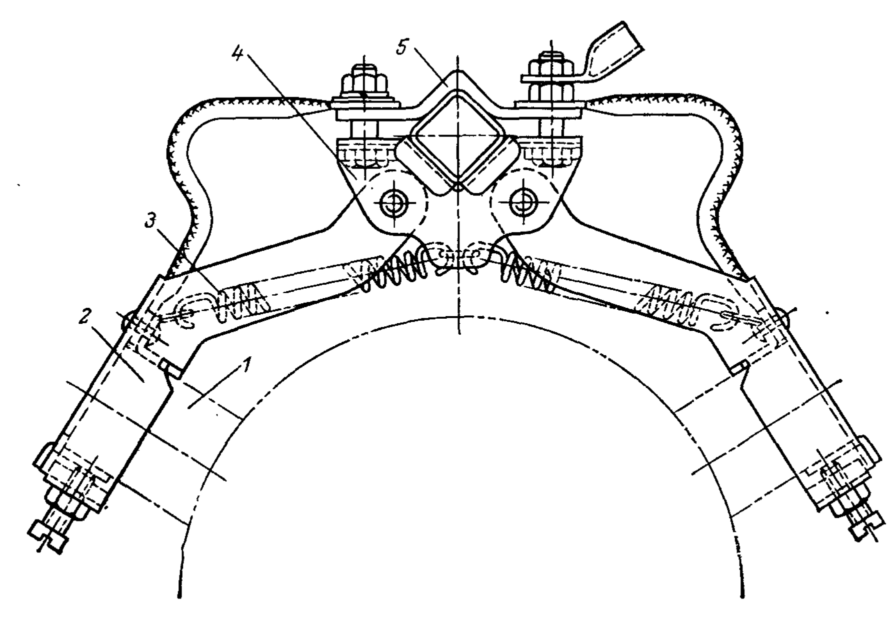


Рис. 7.25. Симметричный парный щеткодержатель асинхронного двигателя с фазным ротором:

1 — щетка; *2* — обойма; *3* — пружина; *4* — основание; *5* — скоба

Щеткодержатели применяют сдвоенные штампованные из латуни или литые из алюминиевого сплава. Щеткодержатели обычно крепят на изолированном стержне прямоугольного сечения. Конструкция щеткодержателей (рис. 7.25) обеспечивает равномерное прижатие щеток к контактным кольцам.

Применяют щетки постоянно налегающие металлографитные марок МГ-2 или МГ-4 при чугунных или стальных кольцах или марки МГСО при медных кольцах (см. табл. 2.2).

Часть третья

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯВНОПОЛЮСНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

Глава восьмая

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ МАШИН

8.1. УСТРОЙСТВО СИНХРОННЫХ МАШИН ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Приведенная в настоящей главе методика расчета распространяется на синхронные явнополюсные машины мощностью от нескольких киловатт до нескольких мегаватт. Синхронные машины указанного диапазона мощностей обычно изготавливаются сериями. В этих сериях пока еще не принят принцип разделения машин по высоте оси вращения, как это сделано у асинхронных двигателей и машин постоянного тока. Синхронные явнополюсные машины принято разделять по габаритам. Каждому габариту соответствует определенный диаметр сердечника статора $D_{1н}$. В табл. 8.1 приведены нормализованные значения диаметров $D_{1н}$, соответствующие наиболее экономичному раскрою листов тонколистовой электротехнической стали (минимальным отходам стали при штамповке).

Габарит машины определяет также и высоту оси вращения h. Исключение составляют габариты 17—21, у которых высота оси вращения h=630 мм, что достигается соответствующим расположением лап машины (см. рис. 1.1). Обычно серия синхронных машин выполняется на двух или трех (реже четырех) габаритах. При этом один габарит имеет несколько (пять-шесть) типоразмеров машин, различающихся мощностью и частотой вращения.

За последние годы отечественным электромашиностроением разработано и освоено в производстве несколько серий синхронных явнополюсных машин общего назначения, которые по своим технико-экономическим показателям соответствуют современным требованиям. К таким сериям следует отнести серию синхронных генераторов СГ2 и серии синхронных двигателей СД2, СДН2 и СДН32. Ниже приведены некоторые сведения о синхронных машинах перечисленных серий.

Трехфазные синхронные генераторы серии СГ2. Эти генераторы предназначены для производства электроэнергии на стационарных дизель-электрических станциях. Исполнение генераторов по способу защиты IP23, а исполнение по способу монтажа IM1001. Возбуждение генераторов осуществляется от тиристорного преобразователя, расположенного вне генератора. Начальное самовозбуждение происходит вследствие наличия остаточного маг-

Таблица 8.1

Габарит	$D_{1н}$, мм	h, мм	Габарит	$D_{1н}$, мм	h, мм
5	280	180	13	740	450
6	327	200	14	850	500
7	393	225	15	990	560
8	423	250	16	1180	630
9	493	280	17	1430	630
10	520	315	18	1730	630
11	590	355	19	2150	630
12	660	400	20	2600	630
			21	3250	630

нетизма сердечника ротора. Генераторы СГ2 укомплектованы аппаратурой, обеспечивающей стабилизацию напряжения на выходе генератора при колебаниях нагрузки. Кроме того, генераторы имеют устройство синхронизации, позволяющее включать генератор в сеть на параллельную работу.

Технические данные генераторов серии СГ2 даны в табл. 8.2. Конструкция синхронных генераторов СГ2 такая же, как и синхронных двигателей серии СД2.

Синхронные двигатели серии СД2. Эти двигатели предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения: насосов, вентиляторов и т. п. Двигатели изготавливаются на напряжения 6000 В и 380 В частотой тока 50 Гц. Исполнение двигателей по способу защиты IP23, а по способу монтажа IM1001. Возбуждение двигателей осуществляется от возбудительного устройства, питаемого от дополнительной обмотки двигателя.

Технические данные некоторых типов синхронных двигателей серии СД2 приведены в табл. 8.3.

Синхронные двигатели рассчитаны для работы с опережающим током статора при коэффициенте мощности $\cos\varphi_1$=0,9.

Таблица 8.2

Тип генератора	Номинальная мощность		Номинальный ток статора, А	Частота вращения, об/мин	КПД, %	Размеры, мм, по рис. 8.2		Масса, т
	кВт	кВ·А				B	L	
СГ2-74/25-6	250	313	452	1000	93,0	890	1330	1,60
СГ2-85/18-10	160	200	289	600	91,3	1005	1260	1,64
СГ2-85/29-10	250	313	453	600	92,6	1005	1370	2,14
СГ2-85/29-12	132	156	224	500	90,5	1005	1260	1,67
СГ2-85/29-12	200	250	361	500	91,9	1005	1370	2,12
СГ2-85/45-12	315	394	569	500	92,7	1005	1500	2,75

Примечание. В числителе обозначения типа генератора указан наружный диаметр сердечника статора, см, а в знаменателе — длина сердечника статора с вентиляционными каналами, см; последние цифры — число полюсов $2p$.

Таблица 8.3

Тип двигателя	Номинальные		Частота вращения, об/мин	Номинальный ток статора, А	КПД, %	Размеры, мм, по рис. 8.2		Масса, т
	мощность, кВт	напряжение, В				B	L	
СД2-85/35-4	630	6000	1500	71,5	94,5	1005	1570	2,65
СД2-85/43-4	800	6000	1500	90,0	95,0	1005	1650	2,95
СД2-74/25-6	250	380	1000	565	94,2	890	1330	1,60
СД2-74/40-6	400	380	1000	715	94,7	890	1630	2,10
СД2-85/45-6	630	6000	1000	71,1	95,0	1005	1650	2,75
СД2-74/27-8	200	380	750	363	93,0	1005	1330	1,62
СД2-74/33-8	250	380	750	451	93,5	890	1470	1,85
СД2-85/40-8	400	6000	750	45,5	93,9	1005	1570	2,70
СД2-85/47-8	500	6000	750	57,0	94,3	1005	1650	2,95
СД2-85/18-10	160	380	600	295	91,8	1005	1260	1,64
СД2-85/18-12	132	380	500	246	90,9	1005	1260	1,67

Примечание. См. примечание к табл. 8.2.

Внешний вид синхронного двигателя серии СД2 (генератора СГ2) показан на рис. 8.1. Возбудительное устройство располагается вне двигателя. Устройство двигателя СД2 (генератора СГ2) показано на рис. 8.2. Сердечник статора *9* разделен радиальными вентиляционными каналами. Крайние пакеты статора зажаты нажимными шайбами *5*, соединенными между собой стяжными шпильками. В пазы статора уложены основная и дополнительная обмотки *3*, выполненные из отдельных катушек. Изоляция обмотки статора термореактивная класса нагревостойкости В.

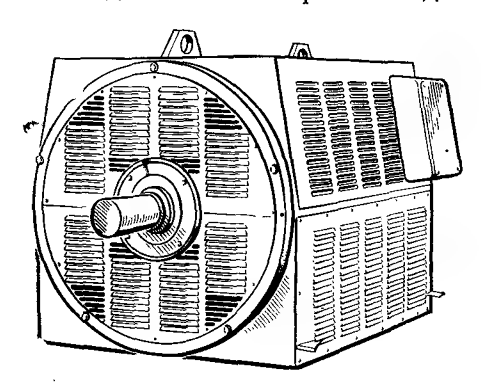


Рис. 8.1. Внешний вид синхронного двигателя серии СД2

Ротор *8* имеет явно выраженные полюсы. Полюсные катушки *12* изготовлены из неизолированной шинной меди, гнутой «на ребро». Все полюсные катушки соединены между собой последовательно. В машинах применены подшипники качения: со стороны контактных колец однорядный шариковый подшипник *13*, а со стороны привода — однорядный роликовый подшипник *1*. Корпус статора *6* сварной с поперечными и продольными ребрами жесткости. Сердечник статора приварен к ребрам жесткости, что предотвращает его осевое смещение и проворачивание. Подшипниковые щиты *2* сварные, центрируются замком в корпусе статора. Контакт-

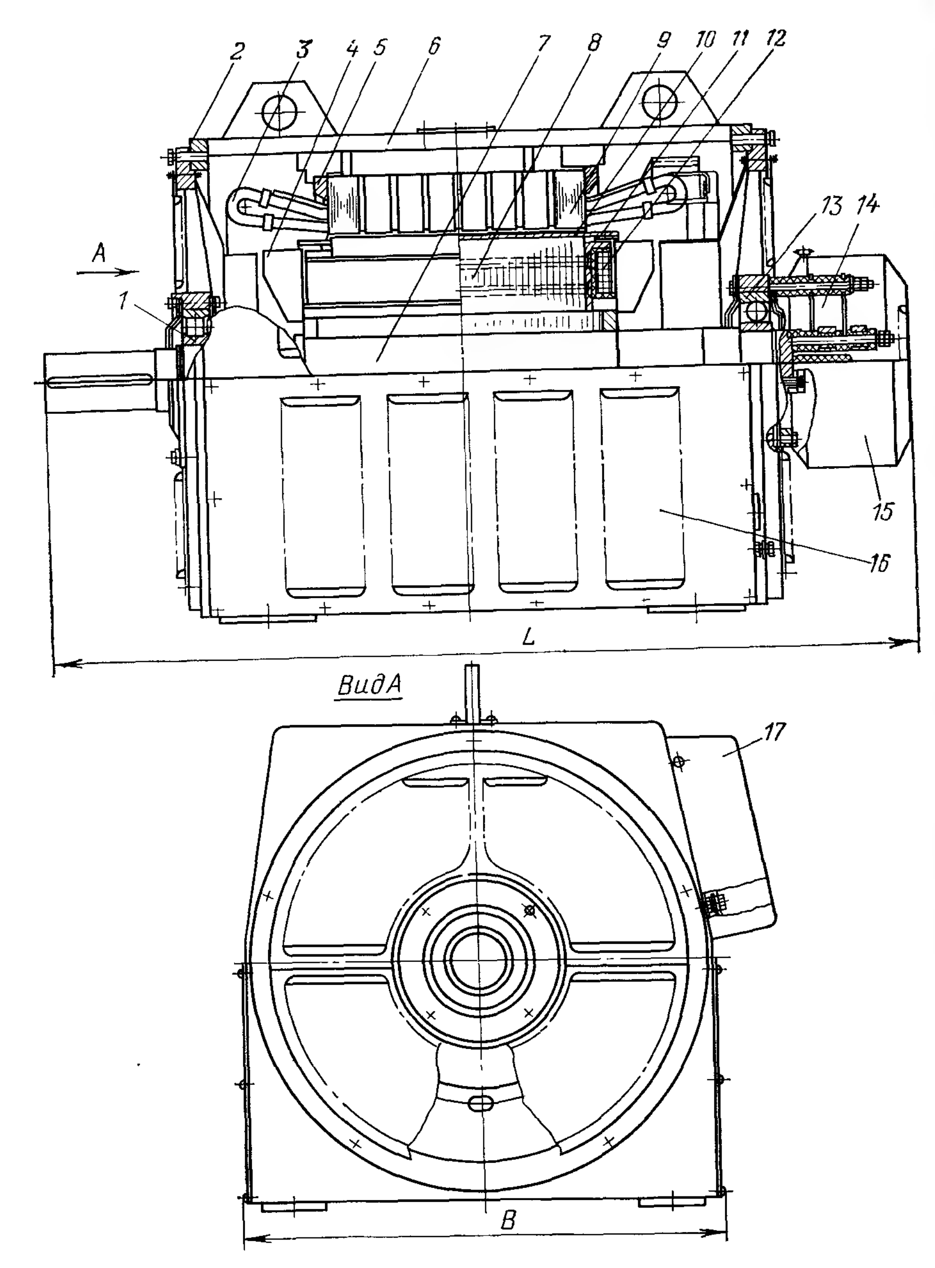


Рис. 8.2. Синхронный двигатель серии СД2

ные кольца *14* чугунные, крепятся на валу *7*. Узел контактных колец снаружи прикрыт стальным съемным колпаком *15*. Коробка выводов *17* расположена на правой боковой поверхности корпуса.

Синхронные двигатели серии СД2 снабжены пусковой клеткой из медных стержней *10*, замкнутых сегментами *11*. Пусковая клетка обеспечивает асинхронный пуск двигателя прямым включением в сеть.

Двигатели СД2 (генераторы СГ2) имеют двустороннюю радиальную вентиляцию. Требуемый для этого напор воздуха создается вентиляционным действием полюсов ротора и вентиляционных лопаток *4*. Воздух поступает в машину через вентиляционные окна в подшипниковых щитах, направляется к лобовым частям обмотки статора и в межполюсное пространство ротора, а затем, пройдя радиальные вентиляционные каналы, выбрасывается наружу через боковые окна *16* в корпусе статора. Вентиляционные окна в подшипниковых щитах и корпусе статора прикрыты жалюзи.

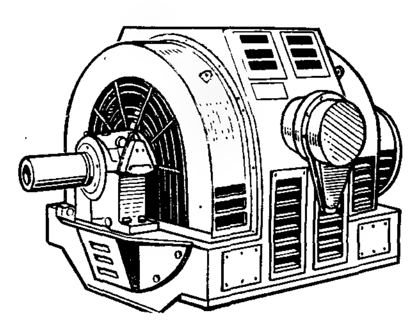


Рис. 8.3. Внешний вид синхронного двигателя серии СДН2

Высота оси вращения в машинах СД2 и СГ2 при 13-м габарите составляет 450 мм, а при 14-м габарите —500 мм.

Синхронные двигатели серий СДН2 и СДН32. Эти двигатели предназначены для привода вентиляторов, насосов, мельниц и других механизмов, не требующих регулирования частоты вращения. Двигатели этих серий выполняются 16-го и 17-го габаритов с наружными диаметрами сердечников статоров соответственно 1180 и 1430 мм. Двигатели рассчитаны для включения в трехфазную сеть частотой 50 Гц напряжением 6000 В.

Двигатели изготавливаются на мощности от 315 до 4000 кВт при частотах вращения от 300 до 1000 об/мин и предназначены для работы с опережающим током при коэффициенте мощности $\cos \varphi_1 = 0{,}9$.

Технические данные некоторых типоразмеров синхронных двигателей указанных серий приведены в табл. 8.4. Двигатели имеют горизонтальное исполнение на двух стояковых подшипниках скольжения.

Двигатели серии СДН2 имеют исполнение по степени защиты IP11, а двигатели серии СДН32— исполнение IP43. Возбуждение двигателей осуществляется от тиристорных преобразователей с автоматическим регулированием тока возбуждения при пуске и остановке двигателей, а также при их аварийных отключениях.

Внешний вид двигателя серии СДН2 показан на рис. 8.3, а его устройство — на рис. 8.4.

Корпус статора *6* сварной из листовой конструкционной стали. Он состоит из стоек, соединенных между собой продольными ребрами жесткости, опорных лап *16* и наружной обшивки. В обшивке корпуса имеются окна с жалюзи и решетками *15* для выхода воз-

Рис. 8.4. Синхронный двигатель серии СДН2

Таблица 8.4

Цифровая часть обозначения типа двигателей серий СДН2 и СДНЗ2	Номинальные данные				Размеры по рис. 8, 4, мм		Масса, т
	Мощность, кВт	Ток статора, А	КПД, %	Частота вращения, об/мин	B	L	
16—36—6	1000	112	95,5	1000	1520	2300	4,6
16—59—6	1600	178	96,2	1000	1520	2580	6,5
17—56—6	2500	276	96,7	1000	1600	2640	9,1
17—89—6	4000	440	97,1	1000	1600	3030	12,4
16—36—8	800	90	94,9	750	1520	2300	4,6
16—59—8	1250	140	95,7	750	1520	2580	6,4
17—71—8	2500	277	96,5	750	1600	2790	10,7
16—36—10	630	71,4	94,6	600	1520	2250	4,6
17—51—10	1600	178	95,9	600	1600	2530	8,5
16—36—12	500	57,5	93,7	500	1520	2250	4,1
17—49—12	1250	141	95,3	500	1600	2490	7,2
17—19—16	315	37	91,1	375	1600	2020	3,9
17—41—16	800	91,5	94,1	375	1600	2300	5,8
17—41—20	500	58	92,8	300	1600	2300	5,7

Примечание. Первые две цифры в цифровой части обозначения двигателей соответствуют габариту (16-й или 17-й), следующие две цифры — длине сердечника статора с вентиляционными каналами, см, последние цифры — числу полюсов $2p$.

духа. У двигателей серии СДНЗ2 обшивка корпуса окон не имеет, а в днище корпуса предусмотрены отверстия для присоединения воздуходувов. В лапах предусмотрены отверстия для крепления двигателя к фундаменту.

Сердечник статора *7* состоит из пакетов-сегментов, собранных из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Пакеты разделены вентиляционными каналами шириной 10 мм каждый, образованными распорками. Сердечник запрессован в корпус статора и закреплен нажимными шайбами (кольцами) *5*, соединенными стяжными шпильками *19*.

Обмотка статора *4* двухслойная, петлевая, с изоляцией класса нагревостойкости *B*. Лобовые части обмотки статора (основной и дополнительной) крепятся к изолированным бандажным кольцам *8*. Пазовая часть обмотки статора удерживается в прямоугольных пазах гетинаксовыми клиньями.

Вводное устройство *22* обмотки статора состоит из корпуса с крышкой и четырех опорных изоляторов. Обмотка статора имеет шесть выводных концов, три из которых (начала фазных обмоток) крепятся к соответствующим изоляторам, а три (концы фазных обмоток) соединены вместе на четвертом изоляторе, образуя нулевую точку. В двигателях мощностью 3200 и 4000 кВт имеются два вводных устройства: одно для начал обмоток фаз, а другое — для концов. В этом случае устройства расположены по обе стороны корпуса двигателя.

Остов ротора *3* явнополюсных синхронных машин может быть шихтованным или сварным. Сердечники полюсов *18* шихтованные из листовой стали толщиной 1,0 или 1,4 мм. Пакет сердечника каждого полюса скрепляют посредством литых нажимных щек и заклепок. Если остов ротора сварной (рис. 8.4), то сердечники полюсов крепятся шпильками *9*. При этом сердечник полюса имеет массивный центральный стержень, в который ввертывают крепящие полюс шпильки. Если остов ротора шихтованный (см. рис. 8.2), то сердечники имеют Т-образные хвостовики, с помощью которых полюсы крепятся на остове. На роторе установлены вентиляционные лопатки *12*.

Обмотка ротора состоит из полюсных катушек *11*, изготовленных из полосовой меди, намотанной «на ребро». Катушки имеют межвитковую изоляцию из асбестовой бумаги. Корпусная изоляция катушек имеет класс нагревостойкости B или F.

Пусковая обмотка состоит из латунных и медных стержней *20*, расположенных в полуоткрытых пазах полюсных наконечников и припаянных к дугообразным медным сегментам *10*, выполненным из полосовой меди, гнутой «плашмя». Сегменты быстроходных двигателей соединены встык накладками *17*. Указанные накладки имеют дополнительное крепление к остову ротора. Сегменты тихоходных двигателей соединены между собой внахлест. Соединенные между собой сегменты образуют короткозамыкающие кольца пусковой клетки.

Контактные кольца *14* стальные подвесного типа, крепятся на конце вала за подшипниковым узлом. Снаружи узел контактных колец прикрыт съемным стальным кожухом.

В двигателях применены графитные щетки марки Г-3 или электрографитные марки ЭГ-4 размером 25×32 мм. Конструкция щеткодержателей обеспечивает равномерное прижатие щеток к кольцам и позволяет регулировать давление на щетку. Траверса для крепления щеткодержателей состоит из двух шин, которые крепятся изолированными шпильками к корпусу подшипника.

Корпус статора с торцевых сторон прикрыт предохранительными стальными щитами *21*, которые закрывают лобовые части обмотки статора и ротор. Щиты двигателей серии СДН2 имеют отверстия для входа охлаждающего воздуха, защищенные жалюзи и решетками. Щиты двигателей серии СДНЗ2 выполнены глухими.

Двигатели обеих серий выполнены без фундаментной плиты, а стояковые подшипники *2* и *13* установлены на подшипниковых полущитах *1*, приваренных к нижней части корпуса статора.

В двигателях применены подшипники скольжения с кольцевой смазкой.

Высота оси вращения для всех двигателей серий СДН2 и СДНЗ2 составляет 630 мм .Охлаждение двигателей — воздушное. Двигатели мощностью от 315 до 1250 кВт при частоте вращения 300, 375 и 500 об/мин имеют согласную аксиально-радиальную вентиляцию (рис. 8.5, *а* и *б*), а двигатели мощностью 630—4000 кВт с частотой вращения 600, 750 и 1000 об/мин имеют согласную ра-

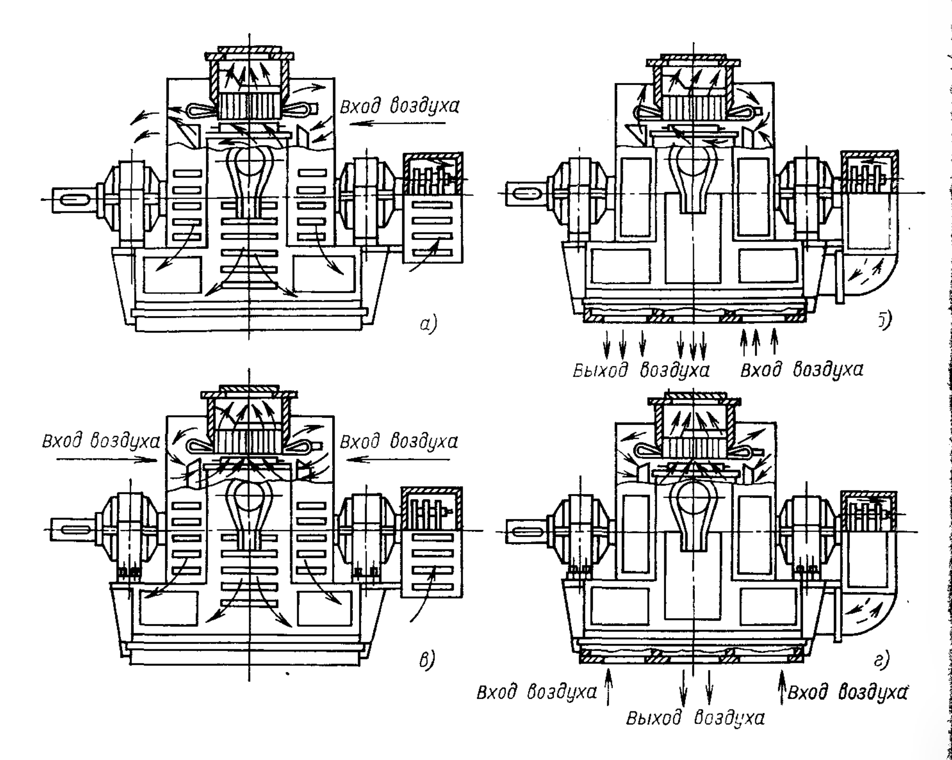


Рис. 8.5. Схемы вентиляции синхронных двигателей:

а — согласная аксиально-радиальная двигателей серии СДН2; *б* — то же серии СДН32; *в* — согласная радиальная двигателей серии СДН2; *г* — то же серии СДН32

диальную вентиляцию (рис. 8.5, *в* и *г*). В двигателях серии СДН2 роль вентиляторов выполняют лопатки, прикрепленные к ободу ротора. В двигателях закрытого исполнения серии СДН32 вентиляция принудительная по замкнутому или разомкнутому циклу. Вентиляция по замкнутой системе осуществляется через отдельно стоящий воздухоохладитель.

В двигателях серий СДН2 и СДН32 контроль температуры статора осуществляется термометрами сопротивления, закладываемыми в пазы. Температура вкладышей подшипников скольжения контролируется встроенными в подшипники термометрами сопротивления.

8.2. ВЫБОР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАГРУЗОК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

По заданным значениям номинальной мощности $P_{ном}$ и числа полюсов $2p$ по табл. 8.5 выбирают номер габарита двигателя. Эта таблица составлена по техническим данным современных серий синхронных явнополюсных машин, и ею можно пользоваться при проектировании аналогичных машин. При этом необходимо иметь в виду, что уменьшение номера габарита относительно значения,

Таблица 8.5

Номинальная мощность, кВт	Номер габарита при числе полюсов $2p$							
	4	6	8	10	12	16	20	40
5,5	5	—	—	—	—	—	—	—
8,0	6	—	—	—	—	—	—	—
11,0	6	—	—	—	—	—	—	—
16,0	6	8	—	—	—	—	—	—
22,0	8	8	—	—	—	—	—	—
30	8	8	—	—	—	—	—	—
45	9	9	—	—	—	—	—	—
55	9	9	—	—	—	—	—	—
75	9	10	10	—	—	—	—	—
132	10	10	—	—	14	—	—	—
160	10	—	13	14	14	—	—	—
200	10	—	13	14	14	—	—	—
250	—	13	13	14	14	—	—	—
315	—	13	13	14	14	17	17	—
400	—	13	14	14	17	17	17	—
500	—	14	14	14	16	17	17	—
630	14	14	14	16	16	17	—	20
800	14	14	16	16	17	17	—	20
1000	14	16	16	16	17	17	—	—
1250	—	16	16	17	17	18	—	—
1600	—	16	17	17	17	19	—	21
2000	—	16	17	17	—	—	—	21
2500	—	17	17	—	18	—	20	21
3150	—	17	—	—	—	—	20	21
4000	—	17	—	—	—	20	—	—
5000	—	—	—	—	—	—	21	21

принятого по табл. 8.5, ведет к увеличению длины машины и уменьшению диаметра ротора. В итоге получают машину с улучшенными динамическими свойствами, но с худшими условиями охлаждения. И наоборот, увеличение номера габарита способствует уменьшению длины машины, а следовательно, увеличению диаметра ротора. При этом условия охлаждения машины улучшаются, а динамические свойства ухудшаются.

Выбрав номер габарита по табл. 8.5, определяем наружный диаметр сердечника статора $D_{1н}$ (см. табл. 8.1). Затем находим внутренний диаметр статора, мм,

$$D_1 = D_{1н}/k_D, \qquad (8.1)$$

где коэффициент k_D зависит от числа полюсов и принимает следующие значения:

$2p$	4	6	8	10	12	16	20	24
k_D	1,52	1,42	1,46	1,32	1,30	1,25	1,20	1,18

Полученное значение D_1 округляют до целого числа и определяют полюсное деление, мм,

$$\tau = \pi D_1/2p. \qquad (8.2)$$

Расчетная мощность, кВ·А, синхронного генератора

$$P_i = k_E P_{ном}/\cos\varphi_1'; \qquad (8.3)$$

синхронного двигателя

$$P_i = k_E P_{ном}/\eta'_{ном} \cos \varphi'_1, \qquad (8.4)$$

где k_E — коэффициент, представляющий собой отношение ЭДС обмотки статора $E_{1ном}$ при номинальной нагрузке машины к номинальному напряжению $U_{1ном}$.

Для синхронных генераторов, работающих с отстающим током статора при коэффициенте мощности $\cos \varphi'_1 = 0{,}8$, принимают $k_E = 1{,}08$, а для синхронных двигателей, работающих с опережающим током статора при $\cos \varphi'_1 = 0{,}9$, $k_E = 1{,}05 \div 1{,}06$.

Предварительное значение КПД $\eta'_{ном}$ принимают по табл. 8.2—8.4 или по каталогу в зависимости от выбора базовой машины.

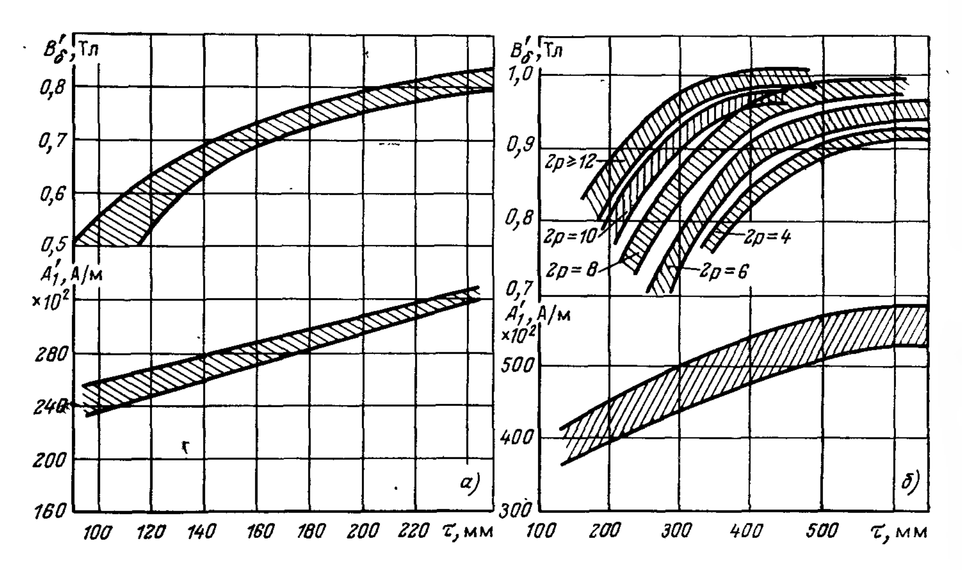


Рис. 8.6. Рекомендуемые значения магнитной индукции B''_δ и линейной нагрузки A'_1 для явнополюсных синхронных машин:
а — мощность до 100 кВт; *б* — мощность более 100 кВт

Предварительные значения максимальной магнитной индукции в зазоре B_δ и линейной нагрузки статора A_1 для системы изоляции класса нагревостойкости *B* определяют по рис. 8.6. Если в проектируемой машине предполагается применение системы изоляции класса нагревостойкости *F*, то принятое по рис. 8.6 значение A_1 следует умножить на 1,15.

Предварительное значение коэффициента полюсного перекрытия для синхронных явнополюсных машин $\alpha'_i = 0{,}65 \div 0{,}68$. Коэффициент формы поля k_B в значительной степени зависит от конфигурации полюсного наконечника ротора. При синусоидальном распределении магнитного поля в зазоре машины $k_B = 1{,}11$. Однако в

синхронных машинах магнитное поле в зазоре несинусоидально. В современных синхронных машинах воздушный зазор под полюсами принимают неравномерным: на краях полюсных наконечников зазор δ_{max} делают больше зазора по оси полюсов δ (рис. 8.7, *а*). Обычно принимают эти зазоры такими, чтобы $\delta_{max}/\delta = 1{,}5$, что соответствует наибольшему приближению формы поля в зазоре к синусоиде.

Форма полюсного наконечника, обеспечивающего указанное распределение магнитного поля в зазоре синхронной машины, оп-

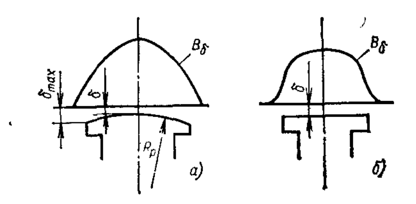


Рис. 8.7. Форма полюсного наконечника при равномерном (*а*) и неравномерном (*б*) воздушных зазорах

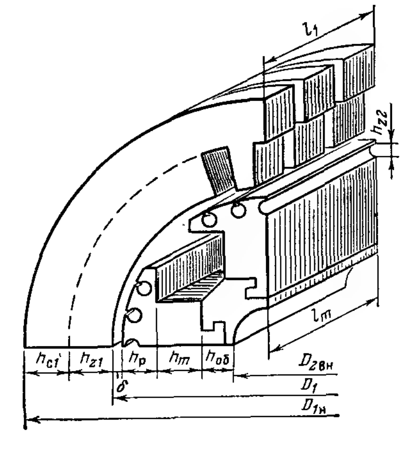


Рис. 8.8. Активная часть синхронной явнополюсной машины

ределяется дугой, описываемой радиусом $R_p < D_1/2$, проведенным из центра, лежащего на продольной оси полюса, мм,

$$R_p = \frac{D_1}{2 + 8D_1\left[(\delta_{max} - \delta)/(\alpha\tau)^2\right]}, \qquad (8.5)$$

где α — конструктивный коэффициент полюсного перекрытия: $\alpha = 0{,}68 \div 0{,}73$.

Для синхронных машин с неравномерным воздушным зазором ($\delta_{max}/\delta > 1$) произведение коэффициентов $\alpha'_i k_B = 0{,}75 \div 0{,}78$. В машинах мощностью до 50 кВт возможно применение равномерного зазора ($\delta_{max}/\delta = 1$) (рис. 8.7, *б*) и тогда $\alpha'_i k_B = 0{,}84 \div 0{,}87$.

Предварительное значение обмоточного коэффициента при двухслойной обмотке статора с относительным шагом $\beta = 0{,}80 \div 0{,}86$ и числе пазов на полюс и фазу $q_1 = 2 \div 6$ принимают равным $k_{об1} = 0{,}92 \div 0{,}96$.

Затем по (4.14) определяют расчетную длину сердечника статора l_i, мм, и, округлив ее до целого числа, определяют отношение

$$\lambda = l_i/\tau. \qquad (8.6)$$

В зависимости от числа полюсов 2р полученное значение λ должно находиться в пределах:

$2p$	4	6; 8	10	12 и более
λ	0,7—1,3	0,8—1,6	1,0—2,0	1,2—2,3

Размеры активной части синхронной явнополюсной машины показаны на рис. 8.8.

При $l_i \geqslant 300$ мм сердечник статора разделяют на пакеты радиальными вентиляционными каналами шириной $b_к = 10$ мм (см. рис. 8.2 и 8.4). Обычно все пакеты делают одинаковой длины $l_{пак} = 40 \div 60$ мм. Тогда конструктивная длина сердечника статора равна, мм,

$$l_1 = l_i + n_к b_к. \quad (8.7)$$

8.3. СЕРДЕЧНИК И ОБМОТКА СТАТОРА

При расчете синхронных машин с высотой оси вращения $h \leqslant 355$ мм (не более 11-го габарита) и напряжением $U_{1ном} \leqslant 660$ В форму паза статора можно принять, руководствуясь рекомендациями табл. 5.9. При расчете синхронных машин с $h \geqslant 400$ мм (более 11-го габарита) и напряжением $U_{1ном} \leqslant 660$ В на статоре принимают прямоугольные полуоткрытые пазы. В высоковольтных машинах, предназначенных для включения в сеть с напряжением 6 или 10 кВ, пазы на статоре делают прямоугольными открытыми (см. рис. 5.6).

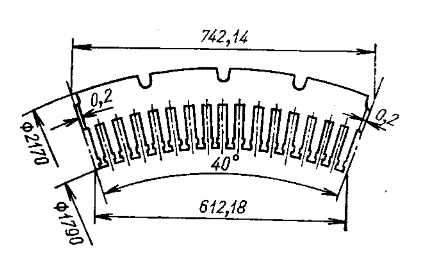


Рис. 8.9. Сегмент сердечника статора ($Z=144$, $Z_с=16$, $C=9$)

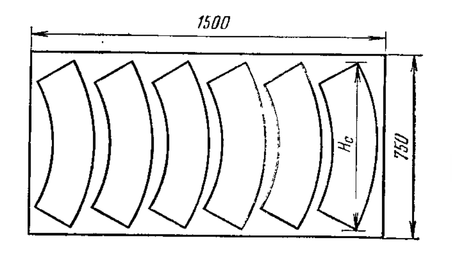


Рис. 8.10. Раскрой листа электротехнической стали на сегменты

Наибольшая ширина рулонов (листов) тонколистовой электротехнической стали составляет 1000 мм, поэтому сердечник статора, начиная с наружного диаметра $D_{1н} = 1180$ мм (16-й габарит), делают сегментированным, т. е. листы сердечника статора составляют из целого числа сегментов С. При этом каждый сегмент должен иметь целое число пазов:

$$Z_с = Z_1/C = \text{целое число}. \quad (8.8)$$

Линии стыков сегментов должны проходить через середины пазов (рис. 8.9). При укладке каждого слоя («кольца») необходимо предусмотреть между сегментами промежутки по 0,4—0,6 мм, чтобы исключить нахлест краев сегментов друг на друга. Стыки сегментов соседних слоев сердечника статора должны быть смещены относительно друг друга на несколько пазовых делений.

Раскрой стандартного листа электротехнической стали на сегменты показан на рис. 8.10. Длина большой хорды сегмента, мм,

$$H_с = D_{1н} \sin(180°/C). \quad (8.9)$$

При выборе числа пазов в сердечнике статора Z_1 руководствуются рекомендациями, выработанными на основании опыта проектирования синхронных машин. По рис. 8.11 и полученному значению полюсного деления определяют два значения зубцового деления: минимальное t_{1min} и максимальное t_{1max}. Затем определяют соответственно максимальное Z_{1max} и минимальное Z_{1min} числа пазов, допускаемые в проектируемой машине:

$$Z_{1max} = \pi D_1/t_{1min}; \quad Z_{1min} = \pi D_1/t_{1max}. \quad (8.10)$$

Полученные по (8.10) значения округляют до целых чисел. Из полученного диапазона возможных значений Z_1 выбирают число пазов, для которого соблюдаются следующие условия:

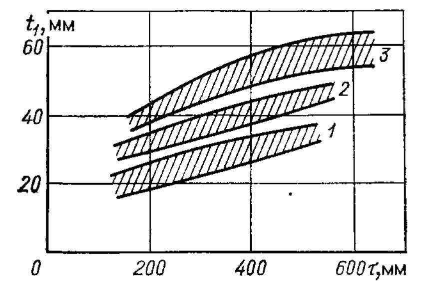


Рис. 8.11. Предельные значения зубцового деления t_1 для синхронных явнополюсных машин:

1 — 13-й и 14-й габариты; *2* — 16-й и 17-й габариты; *3* — 18—21-й габариты

1) число пазов должно быть кратным числу фаз m_1 и числу параллельных ветвей a_1, т. е. Z_1/m_1a_1 — целое число;

2) число пазов на полюс и фазу $q_1 = Z_1/2pm_1$ должно быть либо целым числом ($q_1 = 2 \div 5$) при $2p < 8$ (меньшее значение q_1 соответствует большему $2p$), либо дробным числом ($1\frac{1}{2} < q_1 < 3$) для машин с числом полюсов $2p \geqslant 8$; дробное число q_1 должно иметь вид

$$q_1 = b + c/d, \quad (8.11)$$

где b — целое число, а c/d — правильная несократимая дробь, причем d — знаменатель дробной части числа q_1;

3) число пазов на полюс и фазу $q_1 = Z_1/2pm_1$ должно быть связано с числом параллельных ветвей следующим образом:

а) при целом q_1 отношение $2p/a_1$ должно быть целым числом;

б) при дробном q_1 отношение $2p/a_1d$ — должно быть целым числом, где d — знаменатель дробной части q_1 (см. п. 2);

4) при $D_{1н} > 990$ мм для удобства сегментирования необходимо, чтобы число пазов Z_1 разлагалось на возможно больше простых множителей (2, 3, 5, 7, 11 и т. д.);

5) для машин с разъемным статором ($D_{1н} \geqslant 3250$ мм) число пазов Z_1 должно быть кратным числу разъемов.

Перечисленным условиям обычно удовлетворяют несколько значений Z_1.

Для каждого значения Z_1 определяют число эффективных проводников в пазу $u_п$ и линейную нагрузку A_1 и окончательно принимают такое значение Z_1, для которого уточненное значение линей-

ной нагрузки A_1 минимально отличается от предварительно принятого значения A (не более чем на 5 %). Если же сердечник статора сегментирован (габариты 16-й и более), то для каждого значения Z_1 следует определить хорду сегмента H_c (8.9), а принятое для дальнейшего расчета значение Z_1 должно удовлетворять еще и условию минимальных отходов при раскрое сегментов из стандартного листа электротехнической стали (ширина листов 475, 600, 750 или 1000 мм). Другими словами, хорда сегмента H_c должна быть немногим меньше ширины стандартного листа.

Номинальный ток статора, А,

$$I_{1ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{m_1 U_{1ном} \eta' \cos\varphi_1'} . \quad (8.12)$$

Ток в параллельной ветви обмотки статора не должен превышать 150—200 А, откуда следует, что необходимое число параллельных ветвей обмотки статора равно

$$a_1 = I_{1ном}/150 \div 200. \quad (8.13)$$

Число эффективных проводников в пазу статора

$$u_п = t_1 A_1' a_1 \cdot 10^{-3}/I_{1ном}. \quad (8.14)$$

Полученное значение $u_п$ округляют до четного числа и уточняют значение линейной нагрузки, А/м:

$$A_1 = u_п Z_1 I_{1ном} \cdot 10^3/a_1 \pi D_1. \quad (8.15)$$

Затем рассчитывают площадь поперечного сечения эффективного проводника обмотки статора, мм²,

$$q_{1эф} = I_{1ном}/a_1 \Delta_1'. \quad (8.16)$$

Предварительное значение плотности тока Δ_1' машин защищенного исполнения (IP23) при системе изоляции класса нагревостойкости В и напряжении сети $U_{1ном} \leqslant 6000$ В принимают в зависимости от габарита машины:

Габарит машины	12—14	16—17	18—21
Δ_1', А/мм²	5,5—5,8	5,0—5,5	4,8—5,0

Здесь меньшие значения плотности тока относятся к многополюсным машинам. При изоляции класса нагревостойкости F приведенные значения плотности тока следует умножить на 1,12. При напряжении сети 10 кВ Δ_1' необходимо умножить на 0,85. При выборе предварительного значения плотности тока следует помнить, что с увеличением Δ_1' уменьшается расход обмоточной меди, но при этом растут потери в обмотке статора и ее рабочая температура. С уменьшением Δ_1 растет КПД машины, повышается ее надежность, но ухудшается использование активных материалов.

Затем выбирают стандартное сечение обмоточного провода. При проводах прямоугольного сечения одновременно с выбором стандартного сечения элементарного провода $q_{1эл}$ определяют и его размеры a и b (см. приложение П.1).

Количество элементарных проводов $n_{эл}$ в одном эффективном выбирают так, чтобы сечение провода не превышало 18 мм² с размером по высоте $a \leqslant 3{,}0 \div 3{,}5$ мм. По ширине паза обычно укладывают не более двух проводов («плашмя»), а по высоте — не более четырех (обмотка двухслойная).

Общее число элементарных проводников в пазу

$$n_п = n_{эл} u_п. \quad (8.17)$$

Уточненное значение плотности тока в обмотке статора

$$\Delta_1 = I_{1ном}/n_{эл} q_{эл} \quad (8.18)$$

не должно намного отличаться от предварительно принятого значения Δ_1'.

При выборе конструкции системы изоляции обмотки статора машин до 1000 В следует руководствоваться табл. 5.12—5.14. Конструкция системы изоляции обмотки статора при напряжении 6 и 10 кВ представлена в табл. 8.6.

Используя данные указанной таблицы, определяют двустороннюю толщину изоляции по ширине C_b и по высоте C_h паза.

Для обмоток статоров высоковольтных синхронных машин при напряжении 10 кВ применяют провода марки ПСД с дополнительной изолировкой провода стеклослюдинитовой лентой толщиной 0,09 мм в один слой вполнахлеста. При напряжении от 3 до 6 кВ применяют обмоточный провод марки ПЭТВСД с эмалево-волокнистой изоляцией, (см. табл. П.1.4). Такой провод не требует наложения дополнительной изоляции. При напряжении $U_{1ном} \leqslant 660$ В применяют обмоточные провода марок ПСД и ПЭТВП.

Размеры паза статора в свету, необходимые для размещения в нем требуемого количества элементарных проводов, определяются следующим образом:

ширина паза, мм,

$$b_{п1} = n_{элb} b_{из} + C_b + \delta_{pb}; \quad (8.19)$$

высота паза, мм,

$$h_{z1} = n_{элh} a_{из} + C_h + \delta_{ph} + h_к. \quad (8.20)$$

Здесь $n_{элb}$ и $n_{элh}$ — количество элементарных проводов по ширине и высоте паза; δ_{pb} и δ_{ph} — припуски на разбухание изоляции по ширине и высоте паза:

$$\delta_{pb} = 0{,}05 n_{элb}; \quad \delta_{ph} = 0{,}05 n_{элh}. \quad (8.21)$$

Высота части паза под клин принимается равной $h_к = 4 \div 5$ мм.

Полученные размеры паза округляют до десятых долей миллиметра.

Окончательно размеры паза принимают после расчетов максимальной магнитной индукции в зубце статора, Тл,

$$B_{z1max} = \frac{B_\delta' t_1}{(t_1 - b_{п1}) k_{c1}} \quad (8.22)$$

Таблица 8.6. Изоляция катушек обмоток статора машин переменного тока на напряжение до 10 кВ (класс нагревостойкости В)

Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал: Наименование	Материал: Толщина, мм	Число слоев	Толщина изоляции, мм: по ширине	Толщина изоляции, мм: по высоте
Пазовая часть обмотки		*Корпусная изоляция*				
	1	Стеклослюдинитовая лента ЛС при	0,13			
		U=10 кВ		9 вполнахлеста	2,3	4,7
		U=6 кВ		6 вполнахлеста	1,6	3,2
	2	Лента стеклянная ЛЭС	0,1	1 встык	0,2	0,4
		Толщина изоляции катушечной стороны при				
		U=10 кВ	—	—	2,5	5,1
		U=6 кВ	—	—	1,8	3,6
		Прокладки в пазу				
	3	Стеклотекстолит СТ-1	1	2	—	2
	4, 5	То же	0,5	2	—	2
		Общая толщина изоляции на паз при				
		U=10 кВ	—	—	5,0	14,2
		U=6 кВ	—	—	3,6	11,2
Лобовая часть обмотки	6	Стеклослюдинитовая лента ЛС при	0,13			
		U=10 кВ	—	9 вполнахлеста	2,3	4,7
		U=6 кВ	—	6 вполнахлеста	1,6	3,2
	7	Лента стеклянная ЛЭС	0,1	1 встык	0,2	0,2
		Неплотности и неровности	—	—	1,0	1,0
		Общая толщина изоляции лобовой части при				
		U=10 кВ	—	—	3,5	5,9
		U=6 кВ	—	—	2,8	4,4

и магнитной индукции в спинке статора, Тл,

$$B_{c1}=\frac{0{,}5\alpha_1'\tau B_\delta'}{h_{c1}k_{c1}}, \qquad (8.23)$$

где h_{c1} — высота спинки статора, мм:

$$h_{c1}=0{,}5(D_{1н}-D_1)-h_{z1}. \qquad (8.24)$$

Коэффициент заполнения пакета сталью при лакировке листов $k_{c1}=0{,}95$.

Для низковольтных машин полученные значения B_{z1max} и B_{c1} не должны превышать значений, приведенных в табл. 5.9. При напряжениях 6 и 10 кВ эти значения индукций не должны превышать $B_{z1max}=1{,}6\div2{,}2$ Тл и $B_{c1}=1{,}2\div1{,}5$ Тл. Если же полученные по (8.22) и (8.23) значения магнитных индукций превышают допустимые пределы, то следует пересчитать размеры паза статора и сечение проводов.

Число последовательных витков в обмотке фазы статора

$$w_1=pq_1u_п/a_1. \qquad (8.25)$$

Обмоточный коэффициент обмотки статора

$$k_{об1}=k_{p1}k_{y1}, \qquad (8.26)$$

где k_{p1} — коэффициент распределения:

$$k_{p1}=0{,}5/q_1\sin(30°/q_1); \qquad (8.27)$$

k_{y1} — коэффициент укорочения:

$$k_{y1}=\sin(\beta 90°). \qquad (8.27а)$$

При дробном числе пазов на полюс и фазу $q_1=b+c/d$ в (8.27) вместо q_1 подставляют $bd+c$.

Относительный шаг обмотки статора β при $2p\geqslant4$ предварительно принимают $\beta'=0{,}80\div0{,}86$. Тогда шаг обмотки статора по пазам

$$y_1=\beta' Z_1/2p. \qquad (8.28)$$

Полученное значение y_1 округляют до целого числа, а затем уточняют значение β

$$\beta=2py_1/Z_1 \qquad (8.29)$$

и определяют коэффициент укорочения по (8.27а).

8.4. ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР СИНХРОННОЙ ЯВНОПОЛЮСНОЙ МАШИНЫ

Зазор δ между сердечником статора и полюсными наконечниками ротора является одним из важнейших параметров синхронной машины, во многом определяющим ее технико-экономические показатели.

Так же как и у асинхронных двигателей, уменьшение зазора δ способствует уменьшению потерь, а следовательно, повышению КПД, но при этом удорожается изготовление машины и снижается ее надежность из-за возникновения опасности задевания полюсами ротора сердечника статора. При увеличении зазора возрастают размеры полюсов ротора и полюсных катушек, увеличиваются потери в обмотке возбуждения. Необходимо учитывать также влияние значения зазора на индуктивное сопротивление якоря (ста-

тора) по продольной оси x_{d*}. Этот параметр в значительной степени определяет перегрузочную способность (статическую перегружаемость) синхронной машины $M_{max*}=M_{max}/M_{ном}$. Воспользовавшись рис. 8.12, можно по заданной перегрузочной способности определить соответствующее относительное значение индуктивного сопротивления x_{d*}, а затем из выражения

$$\delta \approx k_x \cdot 10^{-6} \frac{A_1}{B'_\delta} \frac{\tau}{x_{d*}} \qquad (8.30)$$

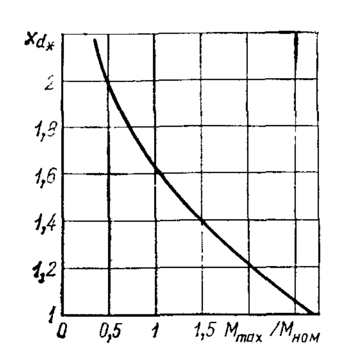


Рис. 8.12. Зависимость x_{d*} от $M_{max}/M_{ном}$ для синхронных машин общего назначения

определить требуемое значение воздушного зазора δ, мм. Коэффициент k_x в (8.30) принимают равным $k_x=0{,}27\div\div0{,}33$, причем меньшие значения k_x соответствуют большему значению x_{d*}.

Согласно ГОСТ 183-74 для синхронных двигателей общего назначения $M_{max}/M_{ном}\geqslant1{,}65$. Например, синхронные двигатели серии СД2 имеют перегрузочную способность 1,7—1,8, а синхронные двигатели серий СДН2 и СДН32 16-го габарита имеют $M_{max}/M_{ном}=1{,}7\div\div1{,}9$, а 17-го габарита — $M_{max}/M_{ном}==1{,}8\div2{,}5$.

При неравномерном воздушном зазоре и отношении $\delta_{max}/\delta=1{,}5$, которое обычно принимают в синхронных явнополюсных машинах, среднее значение воздушного зазора, мм,

$$\delta_{ср} = \delta + (\delta_{max} - \delta)/3 \approx 0{,}78\delta_{max}. \qquad (8.31)$$

8.5. РАСЧЕТ ПОЛЮСОВ РОТОРА И ПУСКОВОЙ ОБМОТКИ

Полюсы ротора обычно шихтуют из листов, выштампованных заодно с полюсным наконечником. Для полюсов чаще применяют конструкционную листовую сталь марки Ст3 толщиной 1,0 или 1,5 мм. Листы обычно не лакируют, так как имеющаяся на их поверхности тонкая оксидная пленка является достаточной изоляцией для ограничения вихревых токов в полюсных наконечниках, обусловленных пульсацией магнитной индукции в зазоре из-за зубчатости статора.

На рис. 8.13 показана конструкция полюса ротора синхронной машины, где сердечник полюса 3, выполненный заодно с полюсным наконечником, крепится на шихтованном ободе 2 посредством Т-образного хвостовика. Этот хвостовик запирается в отверстии обода двумя парами стальных клиньев (шпонок) 8. Обод посажен на вал 1. Для предотвращения распушения сердечника полюса с двух сторон предусматривают стальные щеки 4, стянутые шпильками. Щеки имеют заплечики, удерживающие полюсную катушку 5. В пазах полюсного наконечника расположены стержни 6 пусковой

(успокоительной) клетки, соединенные с двух сторон короткозамыкающими сегментами 7.

Ширину сердечника полюса b_m, мм, определяют по предварительному допустимому значению магнитной индукции в основании сердечника полюса $B'_m=1{,}4\div1{,}6$ Тл:

$$b_m = \frac{\alpha_i B'_\delta \tau l_i \sigma'_m}{B'_m k_{ст} l'_m}, \qquad (8.32)$$

где $k_{ст}$ — коэффициент заполнения сердечника полюса сталью: при толщине листов 1,0 мм $k_{ст}=0{,}95$, а при толщине 1,5 мм $k_{ст}=$

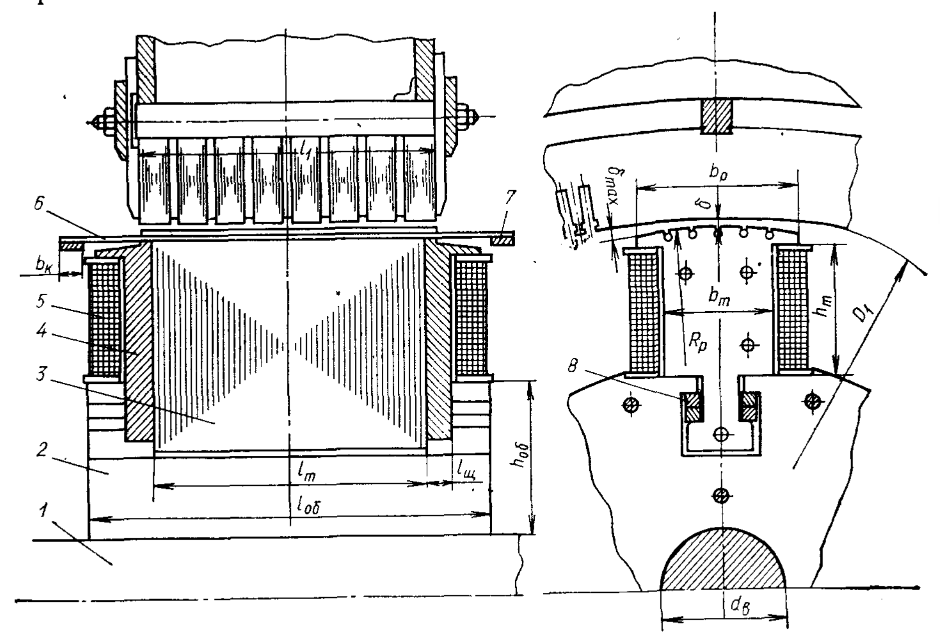


Рис. 8.13. Полюс ротора синхронной машины

$=0{,}97$; l'_m — расчетная длина полюса, мм; $\sigma'_m=\Phi_m/\Phi$—предварительное значение коэффициента рассеяния полюсов:

$$\sigma'_m = 1 + 350k_\delta \delta_{ср}/\tau^2, \qquad (8.33)$$

где $\delta_{ср}$ и τ — в мм.

Значение коэффициента k_σ зависит от высоты полюсного наконечника h_p:

h_p, мм	30	40	50	60	70
k_σ	7	8,5	10	11	12

Высоту h_p принимают по рис. 8.14.

Ширину полюсного наконечника b_p, мм, определяют по конструктивному коэффициенту полюсного перекрытия $\alpha=0{,}68\div0{,}73$:

$$b_p = \alpha\tau. \quad (8.34)$$

Расчетная длина сердечника полюса, мм,

$$l'_m = l_m + l_щ, \quad (8.35)$$

где l_m — длина полюса, мм; $l_щ$ — толщина щеки, мм (см. рис. 8.13), мм.

Длину полюса (полюсного наконечника) l_m принимают равной длине сердечника статора l_1 или на 10—20 мм меньше.

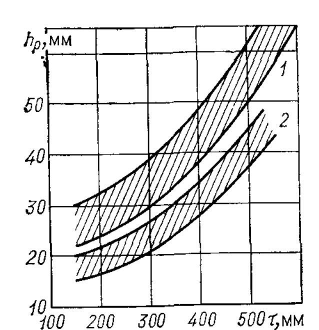


Рис. 8.14. Рекомендуемые значения высоты полюсного наконечника h_p:

1 — с пусковой клеткой; 2 — без нее

Предварительное значение высоты полюса h_m, мм, определяют по одной из приведенных ниже формул:

машины мощностью до 100 кВт

$$h_m \approx (0{,}30\div0{,}35)\,D_1 - (h_p + \delta); \quad (8.36)$$

машины 10—15-го габаритов: при $2p=4$ и 6

$$h_m = (0{,}45\div0{,}55)\,b_p; \quad (8.37)$$

при $2p\geqslant8$

$$h_m \approx 10{,}5\delta + 80; \quad (8.38)$$

машины 16—20-го габаритов

$$h_m \approx 16 + 33{,}5\sqrt[4]{\tau}. \quad (8.39)$$

Размеры обода — длину $l_{об}$ и высоту $h_{об}$ — определяют следующим образом. Длина обода, мм,

$$l_{об} = l'_m + \Delta l. \quad (8.40)$$

Предварительно $\Delta l=50\div100$ мм. После расчета полюсной катушки длина обода уточняется и принимается равной наружному размеру катушки по продольной оси машины (см. рис. 8.13). Высота обода, мм,

$$h_{об} = \frac{\sigma'_m\,\alpha_i\,B'_\delta\,\tau l_i}{2B'_{об}\,l_{об}}, \quad (8.41)$$

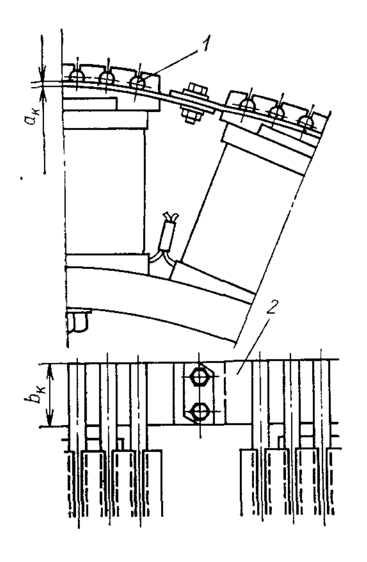
где $B_{об}=1{,}0\div1{,}3$ Тл — допускаемая магнитная индукция в ободе.

Пусковую (успокоительную) обмотку располагают в продольных пазах полюсных наконечников. Стержни каждого полюса с двух сторон соединяют короткозамыкающими сегментами. Сегменты соседних полюсов соединяют друг с другом так, чтобы образовались короткозамыкающие кольца (рис. 8.15).

Назначение пусковой обмотки состоит в ослаблении качаний ротора в переходных режимах синхронной машины. В синхронных двигателях эта обмотка к тому же обеспечивает асинхронный

пуск двигателя. Поэтому применительно к синхронным двигателям, указанную обмотку называют пусковой. Кроме перечисленных функций пусковая обмотка способствует подавлению высших пространственных гармоник поля, обусловленных зубчатостью сердечника статора. Это ведет к снижению добавочных потерь и улучшает форму ЭДС обмотки статора.

Количество стержней пусковой обмотки на одном полюсе $N_2=5\div10$. Стержни обычно имеют круглое сечение, выполняются из



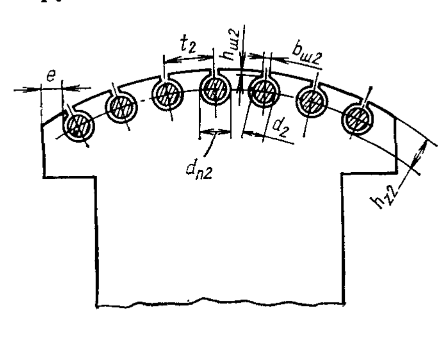


Рис. 8.15. Пусковая (успокоительная) обмотка:

1 — стержень; 2 — короткозамыкающий сегмент

меди, а в некоторых случаях для получения повышенного пускового момента — из латуни. Возможна и комбинация: крайние стержни делают латунными, а средние — медными.

Площадь поперечного сечения стержня клетки, мм²,

$$q_2 = k_{п.к}\,\tau A_1/N_2\,\Delta_1, \quad (8.42)$$

где Δ_1 — плотность тока в обмотке статора, А/мм² [см. (8.18)].

Коэффициент $k_{п,к}$ для синхронных генераторов принимают равным $k_{п,к}=(0{,}15\div0{,}25)\cdot10^{-3}$, а для синхронных двигателей $k_{п,к}=(0{,}25\div0{,}35)\cdot10^{-3}$.

Диаметр стержня пусковой (успокоительной) клетки, мм,

$$d_2 \approx 1{,}13\sqrt{q_2}. \quad (8.43)$$

Полученное по (8.43) значение округляют до 0,5 мм. Затем уточняют площадь поперечного сечения стержня, мм²,

$$q_2 = \pi d_2^2/4. \quad (8.44)$$

Длина стержня, мм,

$$l_{ст} = l_р + (0{,}2\div0{,}4)\,\tau, \quad (8.45)$$

где $l_р$ — длина полюсного наконечника, мм.

Зубцовый шаг на полюсном наконечнике, мм,

$$t_2 = (b_р - d_2 - 2e)/(N_2 - 1), \qquad (8.46)$$

где e — расстояние от края полюсного наконечника до первого паза, обычно $e=3\div10$ мм (рис. 8.13).

В целях уменьшения добавочных потерь в синхронных двигателях и исключения «прилипания» ротора к сердечнику статора зубцовый шаг t_2 и число стержней N_2 выбирают такими, чтобы соблюдались условия

$$t_2 \geqslant 0{,}8t_1; \quad (N_2 - 1)[1 - (t_2/t_1)] > 0{,}75. \qquad (8.47)$$

Диаметр полузакрытых круглых пазов на полюсном наконечнике, мм,

$$d_{п2} = d_2 + \Delta_{пр}, \qquad (8.48)$$

где $\Delta_{пр}=0{,}2$ мм — припуск на штамповку и укладку стержней в пазы.

Ширина шлица паза $b_{ш2}=3\div4$ мм, а высота шлица паза $h_{ш2}==2\div3$ мм.

Короткозамыкающие сегменты выполняют из медных шин (см. приложение П.1) сечением $q_к$, равным приблизительно половине сумммарного сечения стержней одного полюса, мм^2,

$$q_к = a_к b_к \approx 0{,}5N_2 q_2, \qquad (8.49)$$

при этом толщина шины $a_к$ должна быть не менее $2d_2/3$.

8.6. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Магнитодвижущую силу обмотки возбуждения $F_{в0}$, необходимую для создания в машине требуемого магнитного потока Ф в режиме холостого хода, определяют из расчета магнитной цепи. Требуемое значение магнитного потока в воздушном зазоре, Вб,

$$\Phi = \frac{E_{10}}{4k_B f_1 w_1 k_{об1}}, \qquad (8.50)$$

где E_{10} — ЭДС фазы обмотки статора в режиме холостого хода, равная номинальному напряжению $E_{10}=U_{1ном}$; k_B — уточненное значение коэффициента формы поля, определяют по рис. 8.16 в зависимости от конструктивного коэффициента полюсного перекрытия α, принятого при расчете ширины полюсного наконечника $b_р$, см (8.34).

Затем уточняют максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл,

$$B_\delta = \Phi \cdot 10^6/\alpha_i \tau l_i, \qquad (8.51)$$

где α_i — коэффициент полюсного перекрытия, определяемый по рис. 8.16 в зависимости от α.

Расчет магнитной цепи ведут на пару полюсов. В принципе этот расчет не отличается от расчета магнитной цепи асинхронного двигателя (см. § 5.7) и состоит в определении магнитного напряжения

отдельных участков магнитной цепи. В явнополюсной синхронной машине различают следующие участки магнитной цепи (рис. 8.17): воздушный зазор δ, зубцовый слой статора h_{z1}, спинку статора L_{c1}, зубцовый слой ротора h_{z2}, полюс ротора h_m, обод ротора $L_{об}$, стык между полюсом и ободом $h_{mоб}$.

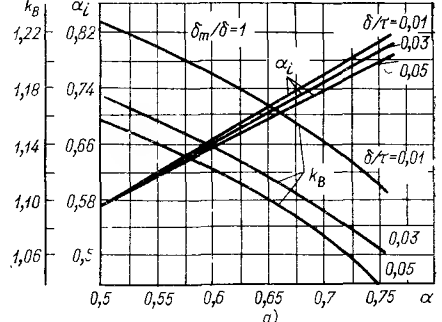
Магнитное напряжение воздушного зазора, А, определяют по (5.152), предварительно рассчитав коэффициент воздушного зазора $k_\delta = k_{\delta1} k_{\delta2}$. Коэффициент воздушного зазора для статора $k_{\delta1}$ и ротора $k_{\delta2}$ определяют по формулам

$$k_{\delta1} = \frac{t_1 + 10\delta_{ср}}{t_1 - b_{п1} + 10\delta_{ср}}; \qquad (8.52)$$

$$k_{\delta2} = \frac{t_2 + 10\delta_{ср}}{t_2 - b_{ш2} + 10\delta_{ср}}. \qquad (8.53)$$

В этих выражениях t_1 и t_2 — зубцовые деления статора и ротора; $b_{п1}$ — ширина паза статора [при полузакрытых пазах вместо $b_{п1}$ в (8.52) следует подставить $b_{ш1}$ — ширину шлица паза статора], мм; $b_{ш2}$ — ширина шлица паза ротора (см. рис. 8.15), мм; $\delta_{ср}$ — среднее значение воздушного зазора по (8.31), мм.

Магнитное напряжение зубцового слоя статора, А, определяют по (5.156). В новых разработках явнополюсных синхронных машин для изготовления сердечника статора следует применять холоднокатаные изотропные стали марок 2013, 2312, а для машин большой мощности — 2411. При расчете магнитной индукции в зубце статора B_{z1} и определении напряженности поля H_{z1} следует руководствоваться указаниями § 5.7. Но при этом необходимо иметь в виду следующее: при $B_{z1} \leqslant 1{,}9$ Тл напряженность H_{z1} определяют по основной таблице намагничивания для соответствующей марки стали (см. приложение П.2), а при $B_{z1} > 1{,}9$ Тл для определения H_{z1} следует воспользоваться кривыми намагничивания для зубцов (см. рис. П.2.3 или П.2.4), предварительно рассчитав коэффициент $k_{п1}$, учитывающий ответвление части магнитного потока в паз.



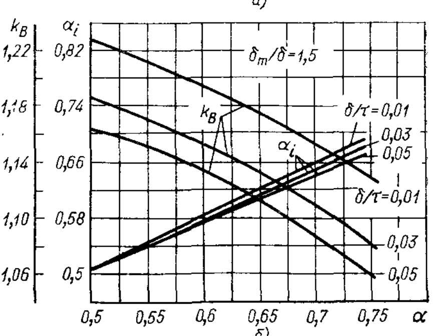


Рис. 8.16. Зависимость α_i и $k_в$ от α: *а* — при равномерном зазоре; *б* — при неравномерном зазоре ($\delta_{max}/\delta=1{,}5$)

Магнитное напряжение зубцового слоя ротора, А, определяют по (5.186), при этом высота зубца на полюсном наконечнике ротора (см. рис. 8.15) равна

$$h_{z2} = d_{п2} + h_{ш2}. \quad (8.54)$$

Напряженность поля в зубцах H_{z2} определяют по магнитной индукции $B_{z2(1/3)}$, Тл, для расчетного сечения, расположенного на высоте $^1/_3 h_{z2}$ от поверхности полюсного наконечника:

$$B_{z2(1/3)} = \frac{B_\delta t_2 l_i}{b_{z2(1/3)} l_m k_{c2}}, \quad (8.55)$$

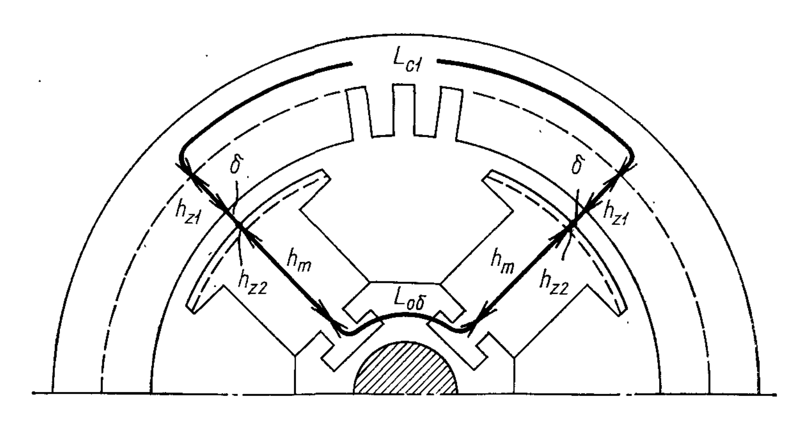


Рис. 8.17. Расчетный участок магнитной цепи явнополюсной синхронной машины

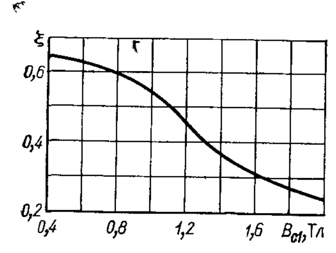


Рис. 8.18. Зависимость ξ от B_{c1}

где $b_{z2(1/3)}$ — ширина зубца ротора на расстоянии $^1/_3$ h_{z2} от поверхности полюсного наконечника, мм:

$$b_{z2(1/3)} = \frac{D_1 - 2\delta - (2/3)\, h_{z2}}{D_1 - 2\delta} t_2 - 0{,}94 d_{п2}. \quad (8.56)$$

При определении напряженности поля H_{z2} следует пользоваться основной таблицей намагничивания приложения П.2 для соответствующей марки стали.

Магнитное напряжение спинки статора, А,

$$F_{c1} = \xi H_{c1} L_{c1} \cdot 10^{-3}, \quad (8.57)$$

где ξ — коэффициент, учитывающий неравномерное распределение магнитной индукции в спинке статора вдоль магнитной линии (рис. 8.18); L_{c1} — средняя длина магнитной линии в спинке статора, мм:

$$L_{c1} = (\pi/2p)(D_{1н} - h_{c1}). \quad (8.58)$$

Напряженность поля в спинке статора H_{c1} определяют по магнитной индукции B_{c1} см. (5.189) и основной таблице намагничивания.

Коэффициент магнитного насыщения сердечника статора и зубцового слоя ротора

$$k_{\mu 1} = F_{\delta zc}/2F_\delta, \quad (8.59)$$

где

$$F_{\delta zc} = 2F_\delta + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{c1}. \quad (8.60)$$

Магнитное напряжение полюса, А,

$$F_m = H_m (h_m + h_p) \cdot 10^{-3}, \quad (8.61)$$

где H_m — напряженность поля у основания полюса, А/м.

Напряженность поля H_m определяют по магнитной индукции в основании полюса, Тл,

$$B_m = \frac{\Phi \sigma_m \cdot 10^6}{l'_m b_m k_{cm}}, \quad (8.62)$$

где l'_m — расчетная длина сердечника полюса (8.35), мм; b_m — ширина сердечника полюса, мм; k_{cm} — коэффициент заполнения сердечника полюса сталью.

Коэффициент рассеяния полюсов ротора можно определить из выражения

$$\sigma_m = \sigma'_m k_{\mu 1}. \quad (8.63)$$

Магнитное напряжение обода ротора, А,

$$F_{об} = H_{об} L_{об} \cdot 10^{-3}, \quad (8.64)$$

где $L_{об}$ — длина магнитной линии в ободе, мм:

$$L_{об} = (\pi/2p)[D_1 - 2\delta - 2(h_m + h_p) - h_{об}]; \quad (8.65)$$

$H_{об}$ — напряженность магнитного поля в ободе, А/м; определяется по магнитной индукции в ободе, Тл,

$$B_{об} = \frac{\Phi \sigma_m \cdot 10^6}{2 l_{об} h_{об} k_{cm}} \quad (8.66)$$

и таблице намагничивания (см. приложение П.2). В машинах средней и большой мощности значение $F_{об}$ невелико и его можно не учитывать.

Магнитное напряжение стыка между полюсом и ободом, А, определяют по приближенной формуле

$$F_{mоб} \approx 250 B_m, \quad (8.67)$$

где B_m — магнитная индукция в основании полюса, Тл (8.62).

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения синхронной машины в режиме холостого хода на пару полюсов определяется суммой магнитных напряжений:

$$F_{в0} = 2F_\delta + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{c1} + 2F_m + F_{об} + 2F_{mоб}. \quad (8.68)$$

Задавшись рядом относительных значений ЭДС статора $E_{10*} = E_{10}/U_{1ном}$, например 0,5; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3, и рассчитав для каждого из этих значений $F_{в0*}$, построим характеристику холостого хода синхронной машины в относительных единицах $E_{10*} = f(F_{в0*})$. За базовое значение относительной МДС $F_{в0*}$ принята МДС, соответствующая ЭДС статора $E_{10} = U_{1ном}$.

Характеристику холостого хода машины $E_{10*} = f(F_{в0*})$ сравнивают с нормальной характеристикой холостого хода явнополюсных синхронных машин:

E_{10*}	0,58	1,0	1,21	1,33	1,44	1,46	1,51
$E_{в0*}$	0,50	1,0	1,50	2,0	2,50	3,0	3,50

Обе характеристики холостого хода, построенные в одних осях координат, должны мало отличаться друг от друга.

Для удобства расчета магнитной цепи следует составить таблицу, аналогичную табл. 8.11.

8.7. РАСЧЕТ МДС ЯКОРЯ ПО ПРОДОЛЬНОЙ И ПОПЕРЕЧНОЙ ОСЯМ

Известно, что реакция якоря в синхронной машине вызывает изменение магнитного поля, которое должно быть учтено при определении МДС обмотки возбуждения, необходимой при работе машины в режиме нагрузки. При расчете этой МДС используют метод «двух реакций», сущность которого состоит в том, что МДС статора разлагают на две составляющие:

продольную, направленную по оси полюсов, А,

$$F_d = F_a \sin\psi_1, \quad (8.69)$$

и *поперечную*, направленную по оси, проходящей через середину межполюсного пространства, А,

$$F_q = F_a \cos\psi_1. \quad (8.70)$$

В этих выражениях ψ_1 — угол сдвига фаз между векторами тока статора и ЭДС, наведенной результирующим магнитным потоком по продольной оси (см. рис. 8.21); F_a — МДС обмотки статора (якоря) на пару полюсов:

$$F_a = 0{,}9 m_1 I_1 w_1 k_{об1}/p. \quad (8.71)$$

При рассмотрении вопроса о влиянии реакции якоря на основное поле синхронной машины пользуются понятиями приведенных МДС реакции якоря по продольной оси

$$F_{ad} = F_d k_{ad} \quad (8.72)$$

и по поперечной оси

$$F_{aq} = F_q k_{aq}. \quad (8.73)$$

где k_{ad} — коэффициент приведения МДС реакции якоря по продольной оси к МДС обмотки возбуждения и k_{aq} — коэффициент

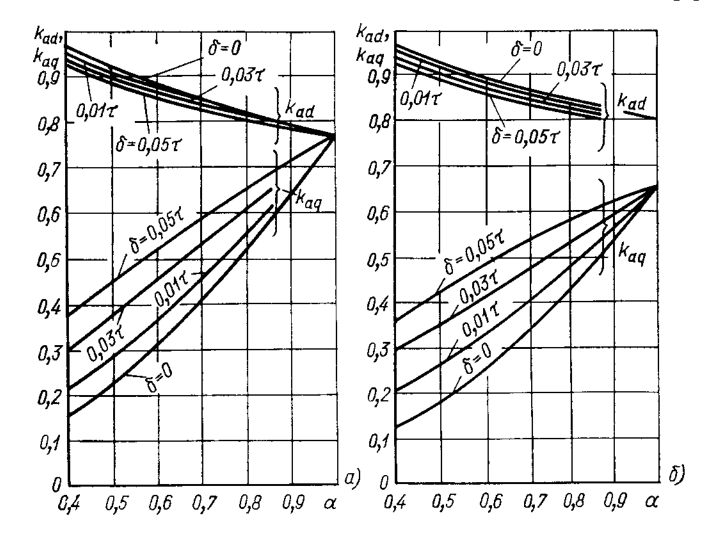


Рис. 8.19. К определению коэффициентов приведения k_{ad} и k_{aq}:
а — при равномерном зазоре; *б* — при неравномерном зазоре ($\delta_{макс}/\delta = 1{,}5$)

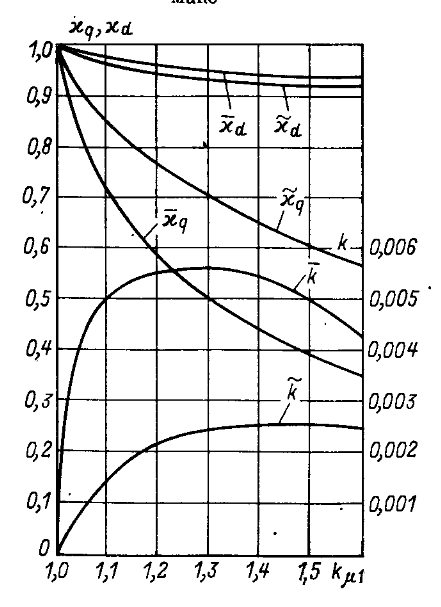


Рис. 8.20. Зависимости $\varkappa_d$, $\varkappa_q$ и k от $k_{\mu1}$

приведения МДС реакции якоря по поперечной оси к МДС обмотки возбуждения. Значения этих коэффициентов определяют по рис. 8.19.

Если магнитная цепь машины не насыщена, то продольное и поперечное магнитные поля не оказывают взаимного влияния, т. е. действуют независимо. Но обычно магнитные цепи синхронных машин насыщены и взаимное влияние продольного и поперечного магнитных полей в нагруженной машине необходимо учитывать. Это достигается умножением МДС F_{ad} и F_{aq} соответственно на коэффициенты $\varkappa_d$ и $\varkappa_q$:

$$F'_{ad} = F_{ad}\varkappa_d; \quad F'_{aq} = F_{aq}\varkappa_q. \quad (8.74)$$

Коэффициенты $\varkappa_d$ и $\varkappa_q$ определяют по рис. 8.20 в зависимости от коэффициента магнитного насыщения сердечника статора $k_{\mu 1}$ (8.59), причем коэффициенты $\bar{\varkappa}_d$ и $\bar{\varkappa}_q$ относятся к машинам с равномерным воздушным зазором ($\delta_{max}/\delta=1$), а коэффициенты $\tilde{\varkappa}_d$ и $\tilde{\varkappa}_q$ — к машинам с неравномерным зазором ($\delta_{max}/\delta=1{,}5$).

Поперечная реакция якоря в машинах с насыщенной магнитной цепью оказывает размагничивающее действие, для компенсации которого необходимо увеличение МДС обмотки возбуждения на значение F_{qd}, А, равное:

при равномерном зазоре

$$F_{qd}=\bar{k}F_q\,\alpha\tau/\delta; \qquad (8.75)$$

при неравномерном зазоре

$$F_{qd}=\tilde{k}F_q\,\tau/\delta. \qquad (8.76)$$

Значения коэффициентов $\bar{\kappa}$ (при равномерном зазоре) и $\tilde{\kappa}$ (при неравномерном зазоре) определяют по рис. 8.20.

8.8. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТКИ СТАТОРА

Статор синхронной машины не отличается от статора асинхронного двигателя. Поэтому для расчета некоторых параметров обмотки статора синхронной машины следует воспользоваться выражениями, приведенными в § 5.4.

Активное сопротивление фазы обмотки статора, приведенное к рабочей температуре r_1, рассчитывают по (5.67), а его относительное значение r_1^* — по (5.68). При этом расчет средней длины лобовой части жестких катушек для высоковольтных машин (6 или 10 кВ) выполняют по (5.65), а затем увеличивают ее на 40 мм.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора x_1 определяют по (5.79), предварительно определив коэффициент магнитной проводимости рассеяния обмотки статора по (5.78). При этом коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния приближенно определяют по формуле

$$\lambda_{д1}\approx 0{,}03\tau\alpha_i/\delta_{ср}k_\delta\,q_1. \qquad (8.77)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора x_{1*} определяют по (5.80).

Индуктивное сопротивление взаимной индукции по продольной оси в относительных единицах

$$x_{ad*}=k_{ad}F_{aном}/2k_{\mu0,5}F_{\deltaном}, \qquad (8.78)$$

где $F_{aном}$ — МДС обмотки статора (якоря), А, соответствующая номинальному току $I_{1ном}$ (8.12); $F_{\deltaном}$ — магнитное напряжение воздушного зазора при ЭДС $E_{10}=U_{1ном}$; $k_{\mu0,5}$ — коэффициент, учитывающий влияние магнитных напряжений стали и зазора между полюсом ротора и статором и зазора между полюсом и ободом; определяют из расчета магнитной цепи при магнитном потоке, соответствующем ЭДС $E_{10}=0{,}5U_{1ном}$:

$$k_{\mu0,5}=F_{в0,5}/[2(F_{\delta0,5}+F_{mоб0,5})]; \qquad (8.79)$$

здесь $F_{в0,5}$ — МДС обмотки возбуждения в режиме холостого хода при ЭДС статора $E_{10}=0{,}5U_{1ном}$, А; $F_{\delta0,5}$ и $F_{mоб0,5}$ — магнитные напряжения воздушного зазора и стыка между полюсом и ободом при ЭДС $E_{10}=0{,}5\,U_{1ном}$, А.

Индуктивное сопротивление взаимной индукции по поперечной оси в относительных единицах

$$x_{aq*}=\frac{k_{aq}F_{aном}}{2k_{\mu0,5}F_{\deltaном}}\,\frac{1+k_\delta}{2}. \qquad (8.80)$$

Синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси в относительных единицах

$$x_{d*}=x_{ad*}+x_{1*}. \qquad (8.81)$$

Синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси в относительных единицах

$$x_{q*}=x_{aq*}+x_{1*}. \qquad (8.82)$$

8.9. РАСЧЕТ МДС ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ НАГРУЗКЕ

Магнитодвижущую силу обмотки возбуждения при нагрузке $F_{в,н}$ рассчитывают по векторным диаграммам, построенным по уравнению напряжения:

для генератора

$$\dot U_1=\dot E_{1н}-j\dot I_1x_1-\dot I_1\,r_1; \qquad (8.83)$$

для двигателя

$$\dot U_1=\dot E_{1н}+j\dot I_1\,x_1+\dot I_1\,r_1, \qquad (8.84)$$

где $E_{1н}$ — ЭДС синхронной машины при нагрузке, т. е. ЭДС, наведенная результирующим магнитным потоком (с учетом реакции якоря).

Рассмотрим порядок построения векторной диаграммы явнополюсной синхронной машины (рис. 8.21) и определения МДС обмотки возбуждения $F_{в,н}$ для номинального режима работы.

1. В соответствии с номинальными значениями тока статора $I_{1ном}$ и фазного напряжения $U_{1ном}$ выбираем масштабы тока m_i, А/мм, и напряжения m_U, В/мм; учитывая угол фазового сдвига $\varphi_{1ном}$, строят векторы $\dot I_{1ном}$ и $\dot U_{1ном}$.

В случае синхронного генератора вектор тока отстает по фазе от вектора напряжения на угол $\varphi_{1ном}$ (рис. 8.21, *а*), а в случае синхронного двигателя опережает его (рис. 8.21, *б*).

2. Из конца вектора $\dot U_{1ном}$ проводим вектор падения напряжения в активном сопротивлении $\dot I_{1ном}r_1$ (параллельно вектору тока) и из конца последнего — вектор падения напряжения в индуктив-

ном сопротивлении $j\dot{I}_{1ном}x_1$ (перпендикулярно вектору тока). В случае синхронного генератора векторы падений напряжений суммируют с вектором $\dot{U}_{1ном}$ (рис. 8.21, *а*), а в случае двигателя вычитают из него (рис. 8.21, *б*). Соединив начало векторной диаграммы (точка *O*) с концом вектора $j\dot{I}_{1ном}x_1$ (для генератора) или вектора $-j\dot{I}_{1ном}x_1$ (для двигателя), получают вектор ЭДС обмотки статора при нагрузке $E_{1н}$.

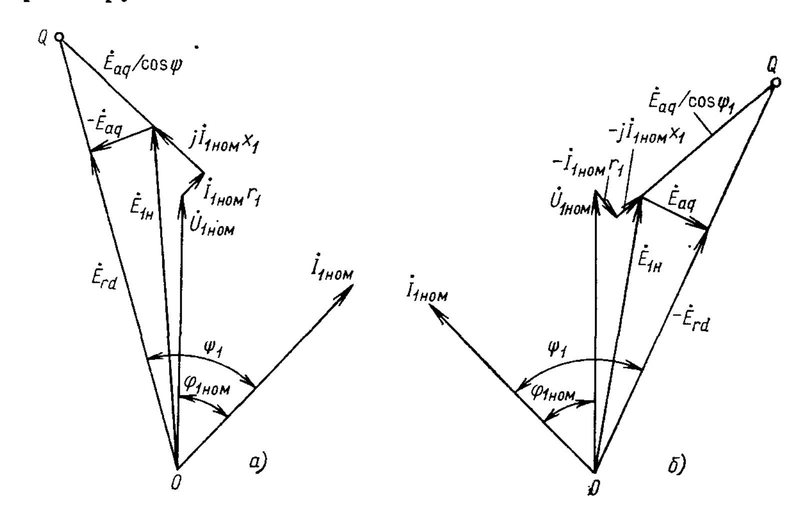


Рис. 8.21. Векторные диаграммы явнополюсной синхронной машины:
а — в режиме генератора; *б* — в режиме двигателя

3. Используя результаты расчета магнитной цепи (см. § 8.6), строим график $E_{10}=f(k_{\mu 1})$ (рис. 8.22), по которому для ЭДС $E_{1н}$ определяем соответствующее значение коэффициента магнитного насыщения $k_{\mu 1}$, а затем по рис. 8.20 находим коэффициенты $\varkappa_d$, $\varkappa_q$ и k.

4. По результатам расчета магнитной цепи строим график $E_{10*}=fF_{\delta zc*}$ (рис. 8.23). Затем определяем МДС статора (якоря) F_a по (8.71) и МДС статора (якоря) по поперечной оси с учетом магнитного насыщения

$$F'_{aq*}/\cos\psi_1 = \varkappa_q k_{aq} F_{a*} \qquad (8.85)$$

и по рис. 8.23 — соответствующую ей ЭДС в относительных единицах $E_{aq*}/\cos\psi_1$. Затем вычисляем значение $E_{aq}/\cos\psi_1$ в абсолютных единицах

$$E_{aq}/\cos\psi_1 = (E_{aq*}/\cos\psi_1)\,U_{1ном} \qquad (8.86)$$

и суммируем вектор этой ЭДС с вектором падения напряжения в индуктивном сопротивлении $j\dot{I}_{1ном}x_1$ (для генератора) или $-j\dot{I}_{1ном}x_1$ (для двигателя). В результате получаем на векторной диаграмме

точку *Q* (рис. 8.21). Соединив эту точку с точкой *O*, получаем прямую *QO*, образующую с вектором тока $\dot{I}_{1ном}$ угол ψ_1.

5. Опустив перпендикуляр из конца вектора $j\dot{I}_{1ном}x_1$ или $-j\dot{I}_{1ном}x_1$ на линию *OQ*, находим векторы ЭДС статора: $\dot{E}_{rd}$ — ЭДС, наведенную результирующим магнитным потоком по продольной оси, и $\dot{E}_{aq}$ — ЭДС, наведенную результирующим магнитным потоком по поперечной оси.

6. Из графика $E_{10*}=f(F_{\delta zc*})$, отложив на оси ординат значение E_{rd*}, получим на оси абсцисс МДС по продольной оси F_{rd*}.

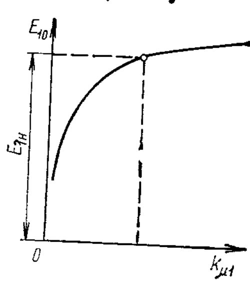


Рис. 8.22. Зависимость E_{10} от $k_{\mu 1}$

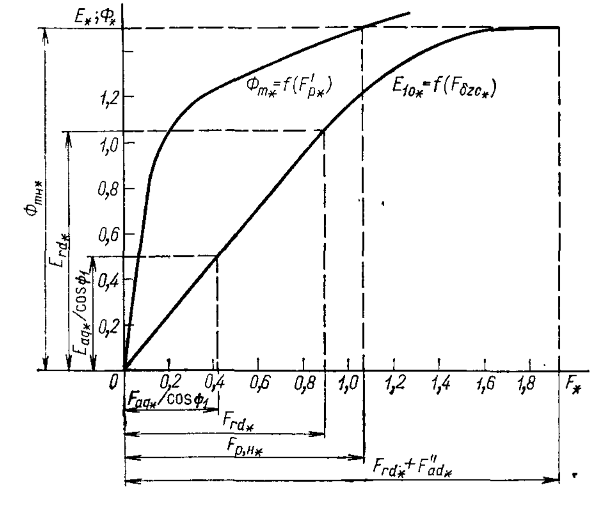


Рис. 8.23. Характеристики намагничивания синхронной машины:
$E_{10*}=f(F_{\delta zc})$; $\Phi_{m*}=f(F_{\delta zc})$ и $\Phi_{m*}=f(F_{p*})$

7. Затем определяем МДС продольной реакции якоря с учетом размагничивающего действия МДС поперечной реакции якоря

$$F''_{ad*} = F'_{ad*} + F_{qd*}, \qquad (8.87)$$

или с учетом (8.69), (8.70), (8.75) и (8.76) при неравномерном зазоре

$$F''_{ad*} = F_{a*}\left(k_{ad}\varkappa_d \sin\psi_1 + \tilde{k}\frac{\tau}{\delta}\cos\psi_1\right). \qquad (8.88)$$

8. Используя результаты расчета магнитной цепи, строим графики $\Phi_{m*}=f(F_{\delta zc*})$ и $\Phi_{m*}=f(F_{p*})$ (рис. 8.23). Отложив на оси абсцисс сумму $F_{rd*}+F_{ad*}$, найдем поток $\Phi_{mн}$ в основании полюса ротора при нагрузке машины. Затем отложив на оси ординат значение магнитного потока $\Phi_{mн*}$, определяем магнитное напряжение в роторе при нагрузке $F_{р,н*}$.

9. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения на пару полюсов при нагрузке машины, А,

$$F_{в,н} = F_{rd} + F''_{ad} + F_{р,н}, \qquad (8.89)$$

где

$$F_{р,н} = F_{р,н*}\,F_{в0ном}. \qquad (8.90)$$

8.10. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Для питания обмотки возбуждения в современных синхронных машинах применяют тиристорные возбудительные устройства. Технические данные некоторых из этих устройств приведены в табл. 8.7. Применение пониженного напряжения для питания об-

Таблица 8.7

Тип устройства	Мощность, кВт	Номинальное напряжение, В
ТВУ-46-320	14,7	46
ТВУ-65-320	20,8	65
ТВУ-80-320	25,6	80
ТВУ-105-320	33,6	105
ТВУ-137-320	43,8	137
ТВУ-166-320	53,0	166
ТЕ8-320/48Т	15,4	48
ТЕ8-320/75Т	24,0	75
ТЕ8-320/150Т	48,0	150

Прнмечание. Все устройства рассчитаны на номинальный ток 320 А.

мотки возбуждения позволяет повысить ток возбуждения $I_в$ и получить небольшое число витков в полюсной катушке при большом сечении проводника. Эта мера способствует лучшему заполнению катушек медью и более эффективному отводу теплоты от них.

При расчете обмотки возбуждения можно воспользоваться номинальными значениями напряжения возбудительных устройств $U_{в,ном}$, уменьшив их на 2 В (падение напряжения в контакте щеток с кольцами).

Предварительное сечение медной проволоки для катушки возбуждения, мм²,

$$q'_в = \rho'_{Cu} p F'_{в,н} l_{в,ср} \cdot 10^3 / U_в, \qquad (8.91)$$

где $F'_{в,н} = (1,1 \div 1,2) F_{в,н}$ — расчетное значение МДС обмотки возбуждения, А; ρ'_{Cu} — удельное сопротивление меди при рабочей температуре, для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости В: многослойной $\rho_{Cu} = 25 \cdot 10^{-9}$ Ом·м, однослойной $\rho_{Cu} = 25{,}6 \times 10^{-9}$ Ом·м; $l_{в,ср}$ — средняя длина витка катушки, мм; $U_в$ — напряжение непосредственно на обмотке возбуждения, В:

$$U_в = U_{в,ном} - 2. \qquad (8.92)$$

Многослойные полюсные катушки имеют худшее заполнение медью и худшие условия охлаждения. По этой причине многослойные катушки применяются лишь в машинах мощностью не более 100 кВт. В синхронных машинах мощностью свыше 100 кВт получили применение однослойные катушки из неизолированной медной проволоки прямоугольного сечения более 30 мм², намотанной на ребро.

В многослойных полюсных катушках сечение проволоки не должно превышать 30—40 мм². Если сечение меньше 5—6 мм², то следует задаться более низким напряжением возбуждения, так чтобы получить большую площадь поперечного сечения проводника. Применение для полюсных катушек проводов круглого сечения нежелательно, так как это ухудшает теплоотвод от обмотки возбуждения. Исключение составляют машины мощностью не более 20 кВт, в которых невозможно применение проводов прямоуголь-

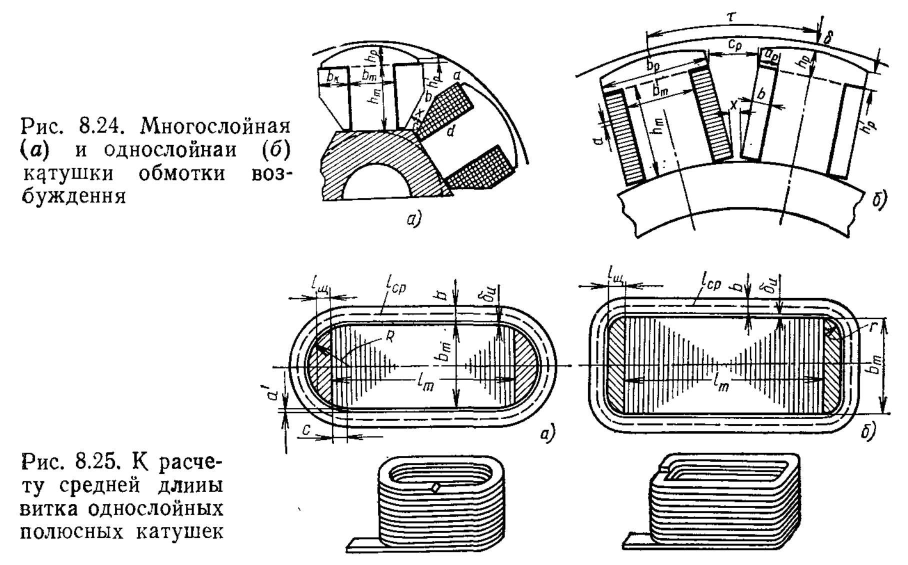


Рис. 8.24. Многослойная (а) и однослойнаи (б) катушки обмотки возбуждення

Рис. 8.25. К расчету средней длииы витка однослойных полюсных катушек

ного сечения. В однослойных полюсных катушках (машины мощностью более 100 кВт) сечение медной проволоки может составлять от 30 до 300 мм².

Средняя длина витка полюсной катушки $l_{в,ср}$ зависит от вида катушки.

Для многослойных полюсных катушек (рис. 8.24, *а*)

$$l_{в,ср} = 2(l_m + b_m + 4\delta_и) + \pi b_к. \qquad (8.93)$$

Для однослойных катушек (рис. 8.24, *б*):

с лобовой частью в виде полуокружности с радиусом R (рис. 8.25, *а*) (применяется при ширине сердечника полюса $b_m \leqslant 200$ мм)

$$l_{в,ср} = 2(l_m - 2c) + \pi(b_m + 2\delta_и + b'), \qquad (8.94)$$

где c принимают в зависимости от ширины сердечника полюса:

b_m, мм	60	61—100	101—120	121—150	151—200
c, мм	10	12,5	15	20	30

с лобовой частью, выполненной двумя закруглениями радиусом $r \approx b'$ (рис. 8.25, *б*) (применяется при $b_m > 200$ мм)

$$l_{в,ср} = 2(l_m + b_m - 2r) + \pi(2r + 2\delta_и + b'). \qquad (8.95)$$

В этих выражениях b' — предварительное значение ширины проводника катушки: $b' \approx (0{,}05 \div 0{,}1\tau)$; $\delta_и$ — толщина изоляции между сердечником полюса и катушкой, принимается от 1,5 до 2 мм в зависимости от конструкции изоляции полюсной катушки; $b_к$ — толщина катушки обмотки возбуждения, мм.

Ток возбуждения при нагрузке, А,

$$I_{в,н} = q'_в \Delta'_в, \qquad (8.96)$$

где $\Delta'_в$ — предварительное значение плотности тока в обмотке возбуждения, принимается в зависимости от вида катушек: при многослойных катушках 3,2—3,8 А/мм², при однослойных 3,5—5,3 А/мм² (меньшие значения $\Delta'_в$ соответствуют более длинным машинам).

Число витков катушки обмотки возбуждения (на полюс)

$$w_{к,в} = F_{в,н}/2I_{в,н}. \qquad (8.97)$$

По приложению П.1 для многослойных катушек принимают стандартное сечение провода, ближайшее к $q'_в$, и соответствующие размеры сторон этого провода a и b. При многослойных катушках соотношение сторон проволоки должно удовлетворять условию $b/a = 1{,}5 \div 2{,}0$. После этого выполняют в масштабе эскиз двух соседних полюсов с катушками (рис. 8.24, *а*). При этом размеры проводов принимают с учетом толщины изоляции, а толщину изоляционных прокладок принимают по табл. 8.8. Минимальное расстояние между катушками (размер x на рис. 8.24, *а*) должно быть не менее 7—10 мм. При несоблюдении этого условия размещение катушек на полюсах затрудняется, а условия их охлаждения становятся неудовлетворительными.

В случае однослойных катушек сначала определяют меньший размер прямоугольной проволоки, мм,

$$a = \frac{h_m - \delta_п}{w_{к,в} + 1} - \delta_а, \qquad (8.98)$$

где h_m — высота сердечника полюса, мм; $\delta_п$ — толщина прокладок на ободе и под полюсным наконечником, мм (табл. 8.9); $\delta_а$ — толщина слоев асбестовой бумаги между двумя соседними витками катушки, мм (табл. 8.9).

Больший размер прямоугольной проволоки (ленты), мм,

$$b = q_В / a. \qquad (8.99)$$

Затем по приложению П.1 выбирают стандартную проволоку прямоугольного сечения или ленту. После этого выполняют в масштабе эскиз двух соседних полюсов с катушками (рис. 8.24, *б*). Расстояние x должно быть не менее 7 мм.

Наибольшая ширина прямоугольного провода b_{max}, при которой $x = 7$ мм, равна, мм,

$$b_{max} = 0{,}5\left[\frac{\pi D_1 - 2\delta - 2h_р - 2h_m}{2p} - b_m - 2\delta_п - 7\right], \qquad (8.100)$$

где $\delta_и$ — толщина изоляции между сердечником полюса и катушкой, мм.

Фактическая плотность тока в обмотке возбуждения не должна превышать допустимого значения, А/мм²,

$$\Delta_в = I_{в,н}/q_в, \qquad (8.101)$$

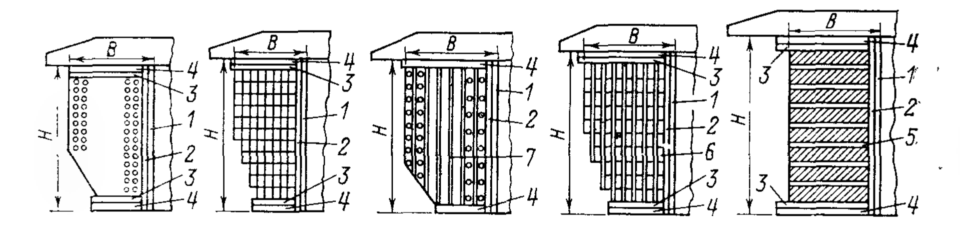
где $q_в$ — поперечное сечение стандартного провода, принятого для полюсной катушки, мм².

Затем следует рассчитать превышение температуры обмотки возбуждения [2]:

для многослойных катушек, °С,

$$\Delta\Theta_в = \frac{(2{,}8 + l_1/\tau) F'_{в,н} \Delta_в \cdot 10}{76 \cdot П_в (1{,}6 + \sqrt{v_2})}\left[1 + \frac{0{,}1\delta_{из}(n_{сл} - 0{,}5)(1{,}6 + \sqrt{v_2})}{2{,}8 + l_1/\tau}\right], \qquad (8.102)$$

Таблица 8.8. **Изоляция многослойных полюсных катушек ротора синхронных машин мощностью до 100 кВт**



Позиция на рисунке	Класс нагревостойкости В			Классы нагревостойкости F и H		
	Материал			Материал		
	Наименование	Толщина, мм	Число слоев	Наименование	Толщина, мм	Число слоев
1	Слюдинитофолий	0,12	16	Стекломикафолий (или миканит формовочный)	0,2 (0,5)	8 (3)
2	Бумага телефонная лакированная	0,07	3	Лента стеклянная	0,1	1 встык
3	Миканит прокладочный	0,5	1	Миканит прокладочный	0,5	1
4	Гетинакс	3—5	1	Стеклотекстолит	3—5	1
5	Бумага асбестовая, дополнительно лакированная	0,3	1 между витками	Бумага асбестовая, дополнительно лакированная	0,3	1 между витками
6	Слюдинит гибкий	0,2	1 между слоями	Стекломиканит гибкий	0,22	1 между слоями
7	Бумага конденсаторная	0,03	То же	Стеклянная ткань	0,025	То же

Примечание. Миканиты, стекломикафолий и стеклотекстолит должны быть изготовлены на связующем, соответствующем классу нагревостойкости изоляции обмотки.

где $\delta_{из}$ — двусторонняя толщина изоляции провода, мм; $n_{сл}$ — число слоев в наиболее широкой части катушки; $П_в$ — периметр боковой поверхности катушки, мм (abc на рис. 8.24, a); v_2 — окружная скорость ротора, м/с:

$$v_2 = \pi D_2 n_1 / 60 \cdot 10^3; \quad (8.103)$$

для однослойных катушек

$$\Delta\Theta_в = \frac{0,3(2,8 + l_1/\tau)\,\overline{b}\Delta_в^2}{1,6 + \sqrt{v_2}}. \quad (8.104)$$

Полученное по (8.103) и (8.105) значение $\Delta\Theta_в$ должно быть меньше допустимого на 10—15 °С. Если же это условие не выполняется, то необходимо выполнить пересчет обмотки возбуждения при другом предварительном значении плотности тока $\Delta_в$, другом напряжении возбуждения $U_в$ или же другом соотношении размеров a и b обмоточного провода.

Затем уточняют высоту полюса, мм,

$$h_m = (a + \delta_a)(w_{к,в} + 1) + \delta_п. \quad (8.105)$$

Если полученное значение высоты полюса отличается от предварительно принятого более чем на 5 %, то следует пересчитать магнитное напряжение полюса ротора.

Активное сопротивление обмотки возбуждения при расчетной температуре, Ом,

$$r_в = \rho_{Cu}\, 2pw_{к,в}\, l_{в,ср} \cdot 10^3 / q_в. \quad (8.106)$$

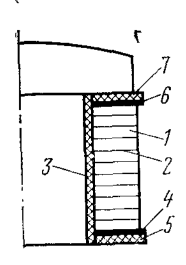


Таблица 8.9. **Изоляция полюсных катушек ротора явнополюсных синхронных машин мощностью свыше 100 кВт**

Позиция на рисунке	Материал: Наименование	Материал: Толщина, мм	Число слоев	Общая толщина, мм
1	Медь полосовая	—	—	—
2	Бумага асбестовая электроизоляционная*	0,2	2	0,4
3	Миканит формовочный (или микафолий, или стекломикафолий)	0,5 (0,2)	3 (8)	1,5 (1,6)
4, 6	Миканит прокладочный	0,5	1	0,5
5	Стеклотекстолит	5	1	5
7	»	8	1	8

* Для класса нагревостойкости В лакируется глифталебакелитовым лаком, для классов F и H — лаком на кремнийорганической основе.

8.11. ПОТЕРИ И КПД

Основные потери в синхронной машине слагаются из электрических потерь в обмотке статора, потерь на возбуждение, основных магнитных потерь и механических потерь.

Электрические потери в обмотке статора, Вт,

$$P_{э1} = m_1 I_1^2 r_1, \quad (8.107)$$

где r_1 — активное сопротивление одной фазы обмотки статора, Ом, при расчетной рабочей температуре (5.67).

Потери на возбуждение:

при возбуждении от тиристорного возбудительного устройства, Вт,

$$P_в = I_{в,н}^2 r_в + \Delta U_щ I_{в,н}, \quad (8.108)$$

где $r_в$ — сопротивление обмотки возбуждения при расчетной рабочей температуре, Ом (8.106); $\Delta U_щ$ — падение напряжения в щеточном контакте: $\Delta U_щ$=2 В;

при возбуждении от генератора постоянного тока (возбудителя), сочлененного с валом синхронной машины, Вт,

$$P_{в,г} = P_в / \eta_в, \quad (8.109)$$

где $\eta_в$=0,80÷0,85 — КПД генератора постоянного тока (возбудителя).

Основные магнитные потери в сердечнике статора синхронной машины $P_{м1}$ рассчитывают по (6.1)—(6.7).

Механические потери, равные сумме потерь на трение в подшипниках, в контактном узле (трение щеток о контактные кольца) и потерь на вентиляцию, Вт,

$$P_{мех} \approx 3,68p\,(v_2/40)^3 \sqrt{l_1 \cdot 10^3}, \quad (8.110)$$

где l_1 — полная длина сердечника статора, мм; v_2 — окружная скорость ротора (8.103), м/с.

Добавочные потери разделяют на добавочные потери холостого хода и добавочные потери при нагрузке.

Добавочные потери холостого хода обусловлены в основном поверхностными потерями в полюсных наконечниках. Они вызваны изменением магнитной индукции из-за зубчатости внутренней поверхности сердечника статора и определяются выражением, Вт,

$$P_п = k_п p b_р l_1 (Z_1 n_1 \cdot 10^{-4})^{1,5} [B_{\delta ном}(k_{\delta 1} - 1) t_1]^2 \cdot 10^{-6}, \quad (8.111)$$

где $B_{\delta ном}$ — магнитная индукция в зазоре, Тл, соответствующая ЭДС $E_{10}=U_{ном}$; $k_п$ — коэффициент, определяемый толщиной листов полюсных наконечников: при толщине 1 мм $k_п$=4,6; 2 мм $k_п$=8,6; при массивных полюсных наконечниках $k_п$=23,3; $b_р$, l_1 и t_1 принимаются в миллиметрах.

Добавочные потери при нагрузке $P_{доб}$ — это потери в обмотке статора от вихревых токов, потери в стали статора и полюсных наконечников ротора от высших гармоник магнитного поля. Доба-

вочные потери при нагрузке в синхронных машинах определяют ориентировочно в процентах полезной мощности для генераторов и подводимой мощности для двигателей. Согласно ГОСТ 183-74 значение этих потерь принимают для машины мощностью до 1000 кВ·А 0,5 %, свыше 1000 кВ·А 0,25—0,4 %.

Суммарные потери в синхронной машине, кВт,

$$\Sigma P = (P_{э1} + P_{в} + P_{м1} + P_{п} + P_{доб} + P_{мех}) \cdot 10^{-3}. \qquad (8.112)$$

Коэффициент полезного действия синхронного генератора

$$\eta_{г} = 1 - \Sigma P/(P_{ном} + \Sigma P), \qquad (8.113)$$

синхронного двигателя

$$\eta_{д} = 1 - \Sigma P/P_{1ном}, \qquad (8.114)$$

где $P_{1ном}$ — мощность, потребляемая двигателем при номинальной нагрузке.

8.12. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИНХРОННЫХ МАШИН

Изменение напряжения синхронного генератора. Если синхронный генератор работал с номинальной нагрузкой и напряжение на его выводах было номинальным, то при отключении нагрузки ($I_1=0$) и сохранении неизменными тока в обмотке возбуждения и частоты вращения напряжение на выводах генератора увеличится до значения U_{10}. Это изменение напряжеия генератора при сбросе нагрузки определяется выражением

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_{10} - U_{1ном}}{U_{1ном}} 100\ \%. \qquad (8.115)$$

Для явнополюсных синхронных генераторов, работающих с коэффициентом мощности $\cos\varphi_1 = 0{,}8$, $\Delta U_{ном} = 30 \div 35\ \%$.

Напряжение холостого хода $U_{10} = E_{10}$ определяют по характеристике холостого хода генератора $E_{10} = f(F_{в0})$, по значению МДС обмотки возбуждения при номинальной нагрузке $F_{в,н}$.

Отношение короткого замыкания (ОКЗ). Отношение короткого замыкания синхронной машины представляет собой отношение тока возбуждения, соответствующего ее номинальному напряжению при холостом ходе $I_{в0ном}$, к току возбуждения при трехфазном коротком замыкании с номинальным током в обмотке статора $I_{в,к,ном}$:

$$ОКЗ = I_{в0ном}/I_{в,к,ном}. \qquad (8.116)$$

Для определения ОКЗ можно воспользоваться выражением

$$ОКЗ = E_{10ном*}/x_{d*}. \qquad (8.117)$$

где $E_{10ном}$ — ЭДС генератора, определяемая продолжением прямолинейной части характеристики холостого хода $E_{10*} = f(F_{в0*})$ при $F_{в0*} = 1$ (рис. 8.26).

Чем больше ОКЗ, тем больше предельная нагрузка синхронного генератора. Для явнополюсных синхронных машин ОКЗ$=0{,}8 \div$ $\div 1{,}8$. С уменьшенеим ОКЗ возрастают колебания напряжения на

выходе генератора при изменениях нагрузки и снижается устойчивость при параллельной работе синхронных генераторов. Однако получение синхронного генератора с большим ОКЗ требует увеличения воздушного зазора, что существенно удорожает машину.

Статическая перегружаемость. Статическая перегружаемость (перегрузочная способность) синхронной машины определяется отношением максимального электромагнитного момента к номинальному:

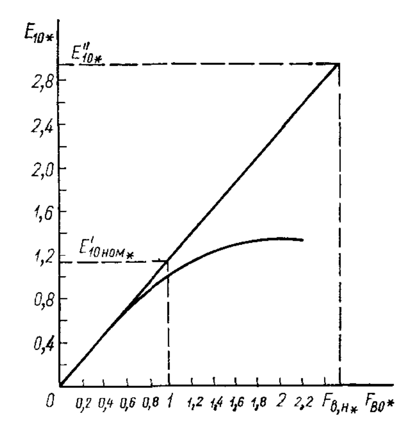


Рис. 8.26. К определению ЭДС E'_{10*} и E''_{10*}

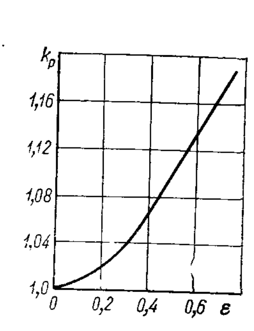


Рис. 8.27. Зависимость $k_р$ от ε

$$M_{max*} = M_{max}/M_{ном}. \qquad (8.118)$$

Статическую перегружаемость синхронной явнополюсной машины можно определить по формуле

$$M_{max*} = E''_{10*} k_р / x_{d*} \cos\varphi_1, \qquad (8.119)$$

где $k_р$ — коэффициент, учитывающий наличие реактивной составляющей электромагнитного момента, обусловленной различием индуктивных сопротивлений по продольной x_{d*} и поперечной x_{q*} осям явнополюсной машины.

Коэффициент $k_р$ определяют по рис. 8.27 в зависимости от коэффициента

$$\varepsilon = (x_{d*} - x_{q*})/x_{q*} E''_{10*}.$$

Электродвижущая сила E''_{10*} в выражении (8.119) определяется по рис. 8.26 на продолжении прямолинейной части характеристики холостого хода до пересечения с вертикалью, проведенной из точки $F_{в,н*}$. Статическая перегружаемость явнополюсных синхронных машин общего назначения должна быть не менее 1,65.

8.13. УПРОЩЕННЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ СИНХРОННЫХ МАШИН

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\Theta_{пов1} = \frac{P_{э1}(2l_1/l_{ср1}) + P_{м1}}{\pi D_1 l_1 \alpha_1 (1 + 0,1v_2)}, \qquad (8.120)$$

где v_2 — окружная скорость ротора, м/с; α_1 — коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника статора, принимается в зависимости от отношения l_1/τ:

l_1/τ	2	2,1—4,0	4,1—5,0
α_1, Вт/(мм²·°С)	$8\cdot10^{-5}$	$6,6\cdot10^{-5}$	$5,7\cdot10^{-5}$

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора $\Delta\Theta_{из1}$ определяют по (6.94).

Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\Theta_{л1} = \frac{A_1 \Delta_1 t_1 \rho_{Cu}\cdot 10^6}{13,3\,(1 + 0,07v_2)\,\Pi_{л1}}, \qquad (8.121)$$

где A_1 — линейная нагрузка, А/м; Δ_1 — плотность тока в обмотке статора, А/мм²; $\Pi_{л1}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки обмотки статора (6.100), мм; ρ_{Cu} — удельное электрическое сопротивление меди, Ом·м, при расчетной температуре (см. табл. 2.1).

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\Theta_1 = [(\Delta\Theta_{из1} + \Delta\Theta_{пов1})\, l_1 + (\Delta\Theta_{из1} + \Delta\Theta_{л1})\, l_{л1}]\, 2/l_{ср1}. \qquad (8.122)$$

8.14. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Задание. Рассчитать трехфазный синхронный двигатель на базе серии СДН2.

Исходные данные:

номинальная мощность $P_{ном}$=630 кВт;

частота тока сети f_1=50 Гц;

номинальное напряжение сети (линейное) U_c=6000 В;

частота вращения ротора f_1=600 об/мин;

коэффициент мощности (опережающий) $\cos\varphi_1$=0,9;

статическая перегружаемость $M_{max*} \geqslant 2$;

режим работы — продолжительный;

конструкции — с горизонтальным расположением вала, исполнение по способу защиты IP11; на роторе пусковая клетка; способ охлаждения IC01; класс нагревостойкости системы изоляции В.

1. Главные размеры двигателя

1.1. По табл. 8.5 выбираем номер габарита — 16, наружный диаметр сердечника статора $D_{1н}$=1180 мм (см. табл. 8.1), высота оси вращения h=630 мм.

1.2. Внутренний диаметр сердечника статора (8.1)

$$D_1 = D_{1н}/k_D = 1180/1,32 \approx 894 \text{ мм};$$

при $2p$=10 принимаем k_D=1,32.

1.3. Расчетная мощность двигателя (8.4)

$$P_i = k_E P_{ном}/\eta'_{ном} \cos\varphi_1 = 1,05\cdot 630/0,946\cdot 0,9 = 777 \text{ кВ·А},$$

где k_E=1,05, а предварительное значение КПД при номинальной нагрузке двигатели принимаем по табл. 8.4 $\eta'_{ном}$=94,6 %.

1.4. Предварительные значении максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре B'_δ и линейной нагрузки A'_1 принимаем по рис. 8.6, *б* при полюсном делении $\tau=\pi D_1/2p=\pi\cdot 894/10$=281 мм

$$B'_\delta = 0,93 \text{ Тл}; \; A_1 = 460\cdot 10^2 \text{ А/м}.$$

1.5. Расчетная длина сердечника статора (4.14)

$$l_i = \frac{6,1\cdot 10^{12} P_i}{k'_B k'_{об} \alpha_i n_1 D_1^2 B'_\delta A'_1} =$$

$$= \frac{6,1\cdot 10^{12}\cdot 777}{1,15\cdot 0,94\cdot 0,66\cdot 600\cdot 894^2\cdot 0,93\cdot 460\cdot 10^2} = 324 \text{ мм},$$

где предварительные значения коэффициентов принимаем: α_i=0,66; $k'_в$=1,15 и $k_{об1}$=0,94.

1.6. Коэффициент длины сердечника статора (8.6)

$$\lambda = l_i/\tau = 324/281 = 1,153,$$

что находится в пределах рекомендуемых значений при $2p$=10.

1.7. Фактическая длина сердечника статора (8.7)

$$l_1 = l_i + n_к b_к = 324 + 6\cdot 10 = 384 \text{ мм}.$$

2. Сердечник и обмотка статора

2.1. Номинальный ток статора (8.12)

$$I_{1ном} = \frac{P_{ном}\, 10^3}{m_1 U_{1ном} \eta'_{ном} \cos\varphi_1} = \frac{630\cdot 10^3}{3\cdot 3468\cdot 0,95\cdot 0,9} = 70,8 \text{ А},$$

где фазное напряжение $U_{1ном}=U_c/\sqrt{3}=6000/\sqrt{3}$=3468 В (схема соединении обмотки статора — звезда). Число параллельных ветвей обмотки статора принимаем a_1=1.

2.2. Число пазов сердечника статора: по рис. 8.11 для 16-го габарита при τ=281 мм определяем минимальное и максимальное значении зубцового делении

$$t_{1min} = 33 \text{ мм}; \quad t_{1max} = 39 \text{ мм}$$

и соответствующие им максимальное и минимальное числа пазов (8.10)

$$Z_{1max} = \pi D_1/t_{1min} = \pi\cdot 894/33 \approx 85;$$

$$Z_{1min} = \pi D_1/t_{1max} = \pi\cdot 894/39 \approx 72.$$

Из полученного диапазона чисел пазов требованиям, перечисленным в § 8.3, удовлетворяют значении 72, 75, 81 и 84.

Результаты расчета хорды H_c по (8.9), числа пазов на полюс и фазу q_1, числа эффективных проводников в пазу $u_п$ по (8.14), зубцового деления t_1 и фактического значения линейной нагрузки A_1 по (8.15) сведены в табл. 8.10.

Анализ таблицы показывает, что варианты № 1 и 4 дают наименьшие отклонении значений A_1 и A'_1 и обеспечивают наиболее экономичный раскрой листов электротехнической стали шириной 600 мм. Однако вариант № 4 являетси более целесообразным, так как ему соответствует меньшее число эффективных

Таблица 8.10

№	Число пазов z_1	Число сегментов	Z_c	H_c, мм	q_1	t_1	$u_п$	A_1, 10^2 А/м
1	$72=2\cdot2\cdot2\cdot3\cdot3$	6	12	590	$2\frac{1}{2}$	40,0	26	473
2	$75=3\cdot5\cdot5$	5	15	694	$2\frac{1}{2}$	37,4	24	455
3	$81=3\cdot3\cdot3\cdot3$	9	9	403	$2\frac{7}{10}$	34,6	22	451
4	$84=2\cdot2\cdot3\cdot7$	6	14	590	$2\frac{4}{5}$	33,4	22	467

проводников в пазу ($u_п=22$), что обеспечивает лучшее заполнение пазов статора медью, поэтому для дальнейшего расчета принимаем вариант № 4 ($Z_1=84$).

2.3. Поперечное сечение эффективного проводника обмотки статора (8.16)

$$q_{1\,эф}=I_{1ном}/a_1\,\Delta_1'=70,8/1\cdot5,5=12,87\ \text{мм}^2,$$

где предварительное значение плотности тока принимаем $\Delta_1'=5,5$ А/мм².

Так как $q_{1эф}<18$ мм², то эффективный проводник не разделяем на элементарные, т. е. принимаем $q_{1эл}=q_{1эф}$.

По табл. П.1.2 принимаем обмоточный провод прямоугольного сечения 13,14 мм² с размерами сторон $a\times b=1{,}8\times7{,}5$ мм.

Учитывая, что проектируемая машина является высоковольтной, принимаем обмоточный провод с эмалево-волокнистой изоляцией марки ПЭТВСД (см. табл. П1. 4) $\dfrac{1,8\times7,5}{2,42\times7,98}$ мм.

2.4. Изоляция паза выполняется в соответствии с табл. 8.6. При 11 проводниках в катушке, уложенных по одному по ширине паза, с учетом допуска на укладку толщина изоляции в пазу равна: по ширине $C_b=3,6$ мм, по высоте $C_h=11,2$ мм.

2.5. Размеры паза в свету:

ширина паза (8.19)

$$b_{п1}=n_{эл\,b}\,b_{из}+C_в+\delta_{pb}=1\cdot7,98+3,6+0,05=11,6\ \text{мм},$$

где $\delta_{pb}=0,05n_{эл\,b}=0,05\cdot1=0,05$ мм; принимаем $b_{п1}=12$ мм;

высота паза (8.20)

$$h_{z1}=n_{эл\,h}\,a_{из}+C_h+\delta_{ph}+h_к=22\cdot2,42+11,2+1,1+4=69,6\ \text{мм},$$

где $\delta_{ph}=0,05n_{эл\,h}=0,05\cdot22=1,1$ мм; $h_к=4$ мм; принимаем $h_{z1}=70$ мм.

2.6. Уточненное значение плотности тока в обмотке статора (8.18)

$$\Delta_1=I_{1ном}/n_{эл}\,q_{эл}=70,8/1\cdot13,14=5,38\ \text{А/мм}^2.$$

2.7. Максимальная магнитная индукция в зубце (8.22) и спинке (8.23) статора

$$B_{z1max}=\frac{B_\delta''\,t_1}{(t_1-b_{п1})\,k_{c1}}=\frac{0,93\cdot33,4}{(33,4-12)\cdot0,95}=1,53\ \text{Тл};$$

$$B_{c1}=\frac{0,5\alpha_i'\,\tau B_\delta'}{h_{c1}\,k_{c1}}=\frac{0,5\cdot0,66\cdot281\cdot0,93}{73\cdot0,95}=1,24\ \text{Тл},$$

где h_c — высота спинки статора (8.24):

$$h_{c1}=0,5\,(D_{1н}-D_1)-h_{z1}=0,5\,(1180-894)-70,0=73\ \text{мм}.$$

Полученные значения магнитной индукции не превышают допустимых значений (см. § 8.3).

2.8. Число последовательно соединенных витков в фазе обмотки статора (8.25)

$$w_1=pq_1\,u_п/a_1=5\cdot2\,\frac{4}{5}\cdot22/1=308.$$

2.9. Шаг обмотки статора (8.28)

$$y_1=\beta Z_1/2p=0,83\cdot84/10\approx7\ \text{(из первого в восьмой паз)};$$

относительный шаг (8.29)

$$\beta=2py_1/Z_1=10\cdot7/84=0,833.$$

2.10. Обмоточный коэффициент (8.26)

$$k_{об1}=k_{p1}\,k_{y1}=0,96\cdot0,97=0,93,$$

где K_{p1} и K_{y1} определяем по (8.27) и (8.27,а):

$$k_{p1}=\frac{0,5}{(bd+c)\sin[30°/(bd+c)]}=\frac{0,5}{(2\cdot5+4)\sin[30°/(2\cdot5+4)]}=0,96,$$

$$\text{где } q_1=b+\frac{c}{d}=2+\frac{4}{5},\quad \text{т. е. } b=2,\quad d=5 \text{ и } c=4;$$

$$k_{y1}=\sin(\beta\cdot90°)=\sin(0,833\cdot90°)=0,97.$$

3. Воздушный зазор

3.1. Относительное значение индуктивного сопротивления обмотки статора по продольной оси x_{d*}; по рис. 8.12 при $M_{max*}=2$ получаем $x_{d*}=1,5$.

3.2. Минимальное значение воздушного зазора (по оси полюса) (8.30)

$$\delta\approx k_x\cdot10^{-6}\,\frac{A_1}{B_\delta'}\,\frac{\tau}{x_{d*}}=0,28\cdot10^{-6}\,\frac{467\cdot10^2}{0,93}\,\frac{281}{1,5}=2,63\ \text{мм};$$

принимаем $\delta=2,6$ мм.

3.3. Зазор по краям полюсного наконечника

$$\delta_{max}=1,5\delta=1,5\cdot2,6=3,9\ \text{мм},$$

3.4. Среднее значение зазора (8.31)

$$\delta_{ср}=\delta+\frac{1}{3}(\delta_{max}-\delta)=2,6+\frac{1}{3}(3,9-2,6)=3,03\ \text{мм}.$$

4. Полюс ротора (см. рис. 8.13)

4.1. Высота полюсного наконечника по рис. 8.14 при $\tau=281$ мм $h_p=30$ мм.

4.2. Ширина полюсного наконечника (8.34)

$$b_p = \alpha\tau = 0,7 \cdot 281 = 197 \text{ мм}.$$

4.3. Высота сердечника полюса (8.39)

$$h_m \approx 16 + 33,5\sqrt[4]{\tau} = 16 + 33,5\sqrt[4]{281} = 150 \text{ мм}.$$

4.4. Длина сердечника полюса l_m и полюсного наконечника l_p

$$l_m = l_p = l_1 = 384 \text{ мм}.$$

4.5. Расчетная длина сердечника полюса (8.35)

$$l'_m = l_m + l_{щ} = 384 + 16 = 400 \text{ мм},$$

где $l_{щ} = 16$ мм.

4.6. **Коэффициент** рассеяния полюсов ротора (предварительное значение) (8.33)

$$\sigma'_m = 1 + 350k_\sigma\delta_{ср}/\tau^2 = 1 + 350 \cdot 8,5 \cdot 3,03/281^2 = 1,13,$$

где $k_\sigma = 8,5$ при $h_p = 30$ мм.

4.7. Ширина сердечника полюса (8.32)

$$b_m = \frac{\alpha_i B'_\delta \tau l_i \sigma'_m}{B'_m k_{cm} l'_m} = \frac{0,66 \cdot 0,93 \cdot 281 \cdot 324 \cdot 1,13}{1,5 \cdot 0,95 \cdot 384} = 118 \text{ мм},$$

где k_{cm} — коэффициент заполнения сердечника полюса сталью; $B'_м = 1,5$ Тл.

4.8. Длина обода (8.40)

$$l_{об} = l_m + \Delta l = 384 + 60 = 444 \text{ мм},$$

где $\Delta l = 60$ мм.

4.9. Высота обода (8.41)

$$h_{об} = \sigma'_m \frac{\alpha_i B'_\delta \tau l_i}{2B'_{об} l_{об}} = 1,13 \frac{0,66 \cdot 0,95 \cdot 281 \cdot 324}{2 \cdot 1,2 \cdot 244} = 60 \text{ мм};$$

магнитную индукцию в ободе предварительно принимаем $B_{об} = 1,2$ Тл.

5. Пусковая клетка

5.1. Число стержней пусковой клетки на один полюс принимаем $N_2 = 7$.

5.2. Поперечное сечение одного стержня (8.42)

$$q_2 = k_{п,к}\tau A_1/N_2\Delta_1 = 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 281 \cdot 467,5 \cdot 10^2/7 \cdot 5,38 = 105 \text{ мм}^2,$$

где $k_{п,к} = 0,3 \cdot 10^{-3}$.

5.3. Диаметр стержня (8.43)

$$d_2 = 1,13\sqrt{q_2} = 1,13\sqrt{105} = 11,6 \text{ мм},$$

принимаем $d_2 = 12,0$ мм, тогда сечение стержня пусковой клетки

$$q_2 = \pi d_2^2/4 = \pi \cdot 12^2/4 = 113 \text{ мм}^2.$$

5.4. Длина стержня пусковой клетки (8.45)

$$l_{ст} = l_p + 0,3\tau = 384 + 0,3 \cdot 281 = 468 \text{ мм}.$$

5.5. Зубцовый шаг на полюсном наконечнике ротора (8.46)

$$t_2 = (b_p - d_2 - 2e)/(N_2 - 1) = (197 - 12 - 2 \cdot 10)/(7 - 1) = 27,5 \text{ мм}.$$

5.6. Проверка условия (8.47) $t_2 \geqslant 0,8t_1$, т. е. $27,5 > 0,8 \cdot 33,4 = 26,7$ мм;

$$(N_2 - 1)[1 - (t_2/t_1)] = (7 - 1)[1 - (27,4/33,4)] = 1,08 > 0,75.$$

5.7. Пазы на роторе принимаем круглыми полузакрытыми, диаметр паза (8.48)

$$d_{п2} = d_2 + \Delta_{пр} = 12,0 + 0,2 = 12,2 \text{ мм},$$

ширина шлица $b_{ш2} = 4$ мм, высота шлица $h_{ш2} = 2$ мм.

5.8. Сечение короткозамыкающего сегмента (8.49)

$$q_к = 0,5N_2 q_2 = 0,5 \cdot 7 \cdot 113 = 395,5 \text{ мм}^2,$$

по табл. П.1.3 принимаем медную шину с размерами $a = \frac{2}{3}d_2 = 8$ мм и $b = 55$ мм, сечение шины $q_к = 429,1$ мм².

6. Расчет магнитной цепи

6.1. Полезный магнитный поток (8.50)

$$\Phi = \frac{E_{10}}{4k_B f_1 w_1 k_{об1}} = \frac{3468}{4 \cdot 1,15 \cdot 50 \cdot 308 \cdot 0,93} = 0,0526 \text{ Вб},$$

где $E_{10} = U_{1ном} = 3468$ В, по рис. 8.16 при $\delta_{max}/\delta = 1,5$, $\alpha = 0,7$ и $\delta/\tau = 3/281 = 0,01$ принимаем $k_B = 1,15$ и $\alpha_i = 0,66$.

6.2. Магнитная индукция в воздушном зазоре (8.51)

$$B_\delta = \Phi \cdot 10^6/(\alpha_i \tau l_i) = 0,0526 \cdot 10^6/(0,66 \cdot 281 \cdot 324) = 0,87 \text{ Тл}.$$

6.3. Коэффициент воздушного зазора

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} = 1,25 \cdot 1,07 = 1,34,$$

где $k_{\delta 1}$ — коэффициент воздушного зазора статора (8.52):

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1 + 10\delta_{ср}}{t_1 - b_{п1} + 10\delta_{ср}} = \frac{33,4 + 10 \cdot 3,03}{33,4 - 13 + 10 \cdot 3,03} = 1,25;$$

$k_{\delta 2}$ — коэффициент воздушного зазора (8.53):

$$k_{\delta 2} = \frac{t_2 + 10\delta_{ср}}{t_2 - b_{ш2} + 10\delta_{ср}} = \frac{27,4 + 10 \cdot 3,03}{27,4 - 4 + 10 \cdot 3,03} = 1,07.$$

6.4 Магнитное напряжение воздушного зазора (5.152)

$$F_\delta = 0,8B_\delta \delta_{ср} k_\delta \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 0,87 \cdot 3,03 \cdot 1,34 \cdot 10^3 = 2824 \text{ А}.$$

6.5. Магнитное напряжение зубцового слоя статора. Для сердечника статора выбрана тонколистовая холоднокатаная электротехническая сталь марки 2013 толщиной 0,5 мм. Ширина зубца в наиболее узком месте

$$b_{zmin} = t_1 - b_{п1} = 33,4 - 12 = 21,4 \text{ мм}.$$

Магнитная индукция в наименьшем сечении зубца (5.157)

$$B_{z1max} = B\delta\, t_1/k_{c1} b_{z1min} = 0,87 \cdot 33,4/0,95 \cdot 21,4 = 1,43 \text{ Тл}.$$

Так как $B_{z1max} < 1,8$ Тл, то расчет магнитного напряжения ведем по магнитной индукции в сечении зубца на высоте 1/3 от его наиболее узкого места, где ширина зубца равна (5.159)

$$b_{z1(1/3)} = \frac{\pi[D_1 + (2/3)h_{z1}]}{Z_1} - b_{п1} = \frac{\pi[894 + (2/3)70]}{84} - 12 = 23,2 \text{ мм}.$$

Магнитная индукция в сечении зубца $b_{z1(1/3)}$ (5.158)

$$B_{z1(1/3)} = B_\delta\, t_1 / k_{c1}\, b_{z1(1/3)} = 0{,}87 \cdot 33{,}4/(0{,}95 \cdot 23{,}2) = 1{,}36 \text{ Тл}.$$

Напряженность поля в зубце по табл. П.2.1 при $B_{z1(1/3)}$=1,32 Тл H_{z1}=220 А/м.

Магнитное напряжение зубцового слоя (5.156)

$$F_{z1} = H_{z1}\, h_{\text{п1}} \cdot 10^{-3} = 280 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 15 \text{ А}.$$

6.6. Магнитное напряжение зубцового слоя ротора. Полюсы с полюсными наконечниками выполнены из конструкционной стали марки Ст3 толщиной 1 мм. Ширина зубца на расстоянии 1/3 от поверхности полюсного наконечника (8.56)

$$b_{z2(1/3)} = \frac{D_1 - 2\delta - (2/3)\, h_{z2}}{D_1 - 2\delta}\, t_2 - 0{,}94 d_2 =$$

$$= \frac{894 - 2 \cdot 2{,}6 - (2/3) \cdot 14{,}2}{894 - 2 \cdot 2{,}6}\, 27{,}5 - 0{,}94 \cdot 12{,}2 = 15{,}8 \text{ мм},$$

где высота зубца ротора (8.54)

$$h_{z2} = d_{\text{п2}} + h_{\text{ш2}} = 12{,}2 + 2 = 14{,}2 \text{ мм}.$$

Магнитная индукция в зубце ротора (8.55)

$$B_{z2(1/3)} = \frac{B_\delta\; t_2\; l_i}{b_{z2(1/3)}\; l_m\, k_{c2}} = \frac{0{,}87 \cdot 27{,}5 \cdot 324}{15{,}8 \cdot 384 \cdot 0{,}95} = 1{,}34 \text{ Тл}.$$

Напряженность поля в зубце ротора при магнитной индукции $B_{z1(1/3)}$=1,34 Тл по табл. П.2.11, H_{z2}=1220 А/м.

Магнитное напряжение зубцового слоя ротора (5.186)

$$F_{z2} = H_{z2}\, h_{z2} \cdot 10^{-3} = 1220 \cdot 14{,}2 \cdot 10^{-3} = 17 \text{ А}.$$

6.7. Магнитное напряжение спинки статора.

Магнитная индукция в спинке статора (5.189)

$$B_{c1} = 0{,}5\alpha_i\, \tau B_\delta / k_{c1}\, h_{c1} = 0{,}5 \cdot 0{,}66 \cdot 281 \cdot 0{,}87/0{,}95 \cdot 73 = 1{,}16 \text{ Тл}.$$

Напряженность поля в спинке статора при B_{c1}=1,16 Тл по табл. П.2.1

$$H_{c1} = 133 \text{ А/м}.$$

Длина средней силовой линии в спинке статора (5.191)

$$L_{c1} = (\pi/2p)\,(D_{1\text{н}} - h_{c1}) = (\pi/10)\,(1180 - 73) = 347 \text{ мм}.$$

Магнитное напряжение спинки статора (8.57)

$$F_{c1} = \xi H_{c1}\, L_{c1} \cdot 10^{-3} = 0{,}44 \cdot 133 \cdot 347 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ А},$$

где ξ по рис. 8.18 равен 0,44.

Коэффициент магнитного насыщения (8.59)

$$k_{\mu 1} = F_{\delta zc}/2F_\delta = 5732/2 \cdot 2824 = 1{,}015,$$

где $F_{\delta zc} = 2F_\delta\; 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{c1} = 2 \cdot 2824 + 2 \cdot 15 + 2 \cdot 17 + 20 = 5732$ А.

6.8. Магнитное напряжение полюса.

Коэффициент магнитного рассеяния полюсов ротора (8.63)

$$\sigma_m = \sigma'_m\, k_{\mu 1} = 1{,}13 \cdot 1{,}015 = 1{,}15.$$

Магнитная индукция в основании полюса (8.62)

$$B_m = \frac{\Phi \sigma_m \cdot 10^6}{l'_m\, b_m\, k_{cm}} = \frac{0{,}0525 \cdot 1{,}15 \cdot 10^6}{384 \cdot 118 \cdot 0{,}95} = 1{,}4 \text{ Тл}.$$

Напряженность поля в полюсе при B_m=1,40 Тл по табл. П.2.11 H_m=1490 А/м.

Магнитное напряжение полюса (8.61)

$$F_m = H_m\,(h_m + h_p) \cdot 10^{-3} = 1490 \cdot (150 + 30) \cdot 10^{-3} = 179 \text{ А}.$$

6.9. Магнитное напряжение обода.

Магнитная индукция в ободе (8.66)

$$B_{\text{об}} = \frac{\Phi \sigma_m \cdot 10^6}{2 l_{\text{об}}\, h_{\text{об}}\, k_{cm}} = \frac{0{,}0525 \cdot 1{,}15 \cdot 10^6}{2 \cdot 444 \cdot 60 \cdot 0{,}95} = 1{,}19 \text{ Тл}.$$

Напряженность поля в ободе при $B_{\text{об}}$=1,19 Тл по табл. П.2.11 $H_{\text{об}}$=825 А/м.

Длина средней силовой линии в ободе (8.65)

$$L_{\text{об}}\, (\pi/2p)\,[D_1 - 2\delta - 2\,(h_m + h_p) - h_{\text{об}}] =$$

$$= (\pi/10)\,[894 - 2 \cdot 2{,}6 - 2\,(150 + 30) - 60] = 148 \text{ мм}.$$

Магнитное напряжение обода (8.64)

$$F_{\text{об}} = H_{\text{об}}\, L_{\text{об}} \cdot 10^{-3} = 825 \cdot 148 \cdot 10^{-3} = 122 \text{ А}.$$

6.10. Магнитное напряжение стыка между полюсом и ободом (8.67)

$$F_{m\text{об}} = 250 B_m = 250 \cdot 1{,}4 = 350 \text{ А}.$$

6.11. Магнитное напряжение ротора (без зубцового слоя)

$$F'_{\text{р}} = 2F_m + F_{\text{об}} + 2F_{m\text{об}} = 2 \cdot 330 + 124 + 2 \cdot 365 = 1514 \text{ А}.$$

6.12. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения на пару полюсов в режиме холостого хода при ЭДС $E_{10} = U_{1\text{ном}}$=3468 В

$$F_{\text{воном}} = F_{\delta zc} + 2F_{z2} + F_{m\text{об}} = 6592 + 2 \cdot 17 + 1514 = 8140 \text{ А}.$$

Результаты расчета магнитной цепи синхронного двигателя при относительных значениях ЭДС E_{10}=0,5; 1,0; 1,1, 1,2; 1,3 приведены в табл. 8.11.

7. *Параметры обмотки статора*

7.1. Средняя длина витка обмотки статора (5.62)

$$l_{1\text{ср}} = 2\,(l_1 + l_{1\text{л}}) + 40 = 2\,(384 + 393) + 40 = 1594 \text{ мм},$$

где $l_{\text{л1}}$ — средняя длина лобовой части обмотки статора (5.65):

$$l_{\text{л1}} = \frac{t_1 y_1}{\sqrt{1 - [(b_{\text{п1}} + 3{,}5)/t_1]^2}} + h_{z1} + 50 =$$

$$= \frac{33{,}4 \cdot 7}{\sqrt{1 - [(13 + 3{,}5)/33{,}4]^2}} + 80{,}2 + 50 = 393 \text{ мм}.$$

7.2. Активное сопротивление одной фазы обмотки статора при расчетной температуре 75° С (5.67)

$$r_1 = \rho_{\text{Cu}}\, w_1\, l_{1\text{ср}} \cdot 10^{-3}/n_{\text{эл}}\, a_1 q_{1\text{эл}} = 21{,}3 \cdot 10^{-9} \cdot 308 \cdot 1594 \cdot 10^3/1 \cdot 1 \cdot 13{,}14 = 0{,}788 \text{ Ом},$$

где $\rho_{\text{Cu}} = 21{,}3 \cdot 10^{-9}$ Ом·м (см. табл. 2.1).

7.3. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния (5.71) с учетом рис. 5.12, *в*

$$\lambda_{\text{п1}} = \frac{h_1 - h''_1}{3 b_{\text{п1}}}\, k_\beta + \frac{h'_1 + h_{\text{к1}}}{b_{\text{п1}}}\, k'_\beta + \frac{h''_1}{4 b_{\text{п1}}} =$$

$$= \frac{68{,}7 - 2{,}2}{3 \cdot 13}\, 0{,}9 + \frac{33{,}1 + 5}{13}\, 0{,}88 + \frac{2{,}2}{4 \cdot 13} = 4{,}15;$$

при β=0,83 по рис. 5.13 k_β=0,9 и k'_β=0,88.

Таблица 8.11

Параметр	Значения параметров при ЭДС E_{10*}				
	0,5	1,0	1,1	1,2	1,3
E_{10}, В	1734	3468	3815	4162	4508
Ф, Вб	0,0262	0,0526	0,0577	0,0630	0,0682
B_δ, Тл	0,435	0,870	0,957	1,040	1,130
F_δ, А	1412	2824	3106	3388	3671
F_{z1}, А	3	15	36	92	228
F_{z2}, А	3	17	51	87	168
F_{c1}, А	5	20	31	62	125
$F_{\delta zc}=2F_\delta+2F_{z1}+2F_{z2}+F_{c1}$, А	2842	5732	6417	7196	8359
$k_{\mu 1}=F_{\delta zc}/2F_\delta$	1,006	1,015	1,033	1,062	1,140
$\sigma_m=\sigma'_m k_{\mu 1}$	1,136	1,150	1,167	1,210	1,290
$\Phi_m=\Phi\sigma_m$, Вб	0,0297	0,0605	0,0673	0,0763	0,0879
B_m, Тл	0,70	1,40	1,56	1,76	1,99
F_m, А	41	179	384	1176	2500
$F_{об}$, А	51	122	169	336	677
$F_{m,об}$, А	175	350	390	440	497
$F'_р=2F_m+F_{об}+2F_{mоб}$, А	483	1180	1717	3568	6671
$F_{в0}=F_{\delta zc}+F'_р$	3325	6912	8134	10 764	16 760
$F_{в0*}=F_{в0}/F_{в\,о\,ном}$	0,48	1,00	1,17	1,55	2,42
$F_{\delta zc*}=F_{\delta zc}/F_{в\,о\,ном}$	0,41	0,83	0,93	1,04	1,18
$F'_{р*}=F'_р/F_{в\,о\,ном}$	0,07	0,17	0,25	0,51	0,96
$\Phi_{m*}=\Phi_m/\Phi_{m\,ном}$	0,49	1,00	1,11	1,26	1,45

7.4. Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния (8.77)

$$\lambda_{д1}=0,03\frac{\tau\alpha_i}{\delta_{ср}k_\delta q_1}=0,03\frac{281\cdot 0,66}{3,5\cdot 1,34\cdot 2,8}=0,423.$$

7.5. Коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей обмотки статора (5.77)

$$\lambda_{л1}=0,34\frac{q_1}{l_1}(l_{л1}-0,64\beta\tau)=0,34\frac{2,8}{384}(393-0,64\cdot 0,83\cdot 281)=0,60.$$

7.6. Коэффициент магнитной проводимости рассеяния обмотки статора (5.78)

$$\lambda_1=\lambda_{п1}+\lambda_{д1}+\lambda_{л1}=4,5+0,423+0,60+5,52.$$

7.7. Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора (5.79)

$$x_1=\frac{1,58 f_1 l_1 w_1^2}{p q_1\cdot 10^8}\lambda_1=\frac{1,58\cdot 50\cdot 384\cdot 308^2}{5\cdot 2,8\cdot 10^8}5,52=11,3\ \text{Ом}.$$

7.8. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в относительных единицах

$$x_{1*}=x_1(I_{1ном}/U_{1ном})=11,3\,(70,8/3468)=0,23.$$

7.9. Магнитодвижущая сила обмотки статора на пару полюсов при номинальной нагрузке (8.71)

$$F_{aном}=0,9m_1 I_{1ном}w_1k_{об1}/p=0,9\cdot 3\cdot 70,8\cdot 308\cdot 0,93/5=10\,951\ \text{А}.$$

7.10. Индуктивное сопротивление взаимной индукции по продольной оси в относительных единицах (8.78)

$$x_{ad*}=\frac{k_{ad}F'_{aном}}{k_{\mu 0,5}\cdot 2F_{\delta ном}}=\frac{0,85\cdot 10\,951}{1,05\cdot 2\cdot 2824}=1,57;$$

по рис. 8.19, *б* при $\alpha=0,7$ и $\delta/\tau=0,01$ получаем $\kappa_{ad}=0,85$ и $\kappa_{aq}=0,4$.

Коэффициент магнитного насыщения при $F_{в0}=3325$ А

$$k_{\mu 0,5}=F_{в0}/[2(F_{\delta 0,5}+F_{m\,об\,0,5})]=3325/[2(1412+175)]=1,05.$$

7.11. Индуктивное сопротивление взаимной индукции по поперечной оси в относительных единицах (8.80)

$$x_{aq*}=\frac{k_{aq}F_{aном}}{k_{\mu 0,5}\cdot 2F_{\delta ном}}\frac{1+k_\delta}{2}=\frac{0,4\cdot 10\,951}{1,05\cdot 2\cdot 2824}\cdot\frac{1+1,34}{2}=0,738.$$

7.12. Синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси в относительных единицах (8.81)

$$x_{d*}=x_{ad*}+x_{1*}=1,57+0,23=1,80.$$

7.13. Синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси в относительных единицах (8.82)

$$x_{q*}=x_{aq*}+x_{1*}=0,738+0,23=0,968.$$

8. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения при нагрузке

8.1. По данным табл. 8.11 строим характеристики намагничивания (см. рис. 8. 23)

$$E_{10*}=f(F_{\delta zc*})\ \text{и}\ \Phi_{m*}=f(F'_{р*}).$$

8.2. Строим векторную диаграмму тока и ЭДС (см § 8.9) при номинальной нагрузке двигателя (рис. 8.28).

Принимаем масштаб напряжений $m_U = 25$ В/мм, тогда длина вектора напряжения $\dot U_1 = U_1/m = 3468/25 = 138{,}7$ мм, а вектор падения напряжения в индуктивном сопротивлении

$$-j\dot I_{1ном}\, x_1/m_U = 70{,}8\cdot 11{,}3/25 = 32 \text{ мм}.$$

Что касается вектора падения напряжения в активном сопротивлении, то в принятом масштабе m_U его длина составляет менее 3 мм, а поэтому на векторной диаграмме этот вектор не показан.

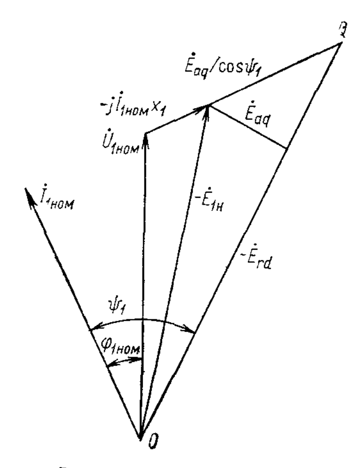


Рис. 8.28. Векторная диаграмма синхронного двигателя

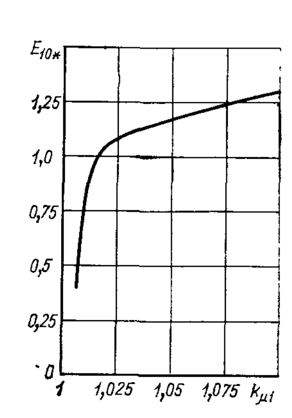


Рис. 8.29. Зависимость E_{10*} от k_{μ_1}

Угол $\varphi_{1ном} = \arccos 0{,}9 = 26°$. После соответствующих построений определяем вектор ЭДС двигателя при нагрузке: $E_{1н} = 155\cdot 25 = 3875$ В. В относительных единицах эта ЭДС $E^*_{1н} = 3875/3468 = 1{,}12$. Затем по графику $E_{10*} = f(\kappa_{\mu 1})$ (рис. 8.29) определяем коэффициент магнитного насыщения $\kappa_{\mu 1}$, соответствующий ЭДС $E_{1н} = 1{,}12$, т. е. $\kappa_{\mu 1} = 1{,}04$. Пользуясь этим значением коэффициента насыщения, по рис. 8.20 определяем коэффициенты $\widetilde{\varkappa}_d = 0{,}97$; $\widetilde{\varkappa}_q = 0{,}92$ и $\widetilde{K} = 6\cdot 10^{-4}$.

8.3. Определяем МДС (8.85)

$$F'_{aq*}/\cos\psi_1 = \widetilde{\varkappa}_q\, k_{aq}\, F_{аном*} = 0{,}92\cdot 0{,}4\cdot 1{,}58 = 0{,}58,$$

где $F_{аном*} = F_{аном}/F_{в0} = 10\,951/6912 = 1{,}58$; $\kappa_{aq} = 0{,}4$ (см. рис. 8.19, *б*).

8.4. Отложив на оси абсцисс графика $E_{10*} = f(F_{\delta zc*})$ (см. рис. 8.23) величину $F'_{aq*}/\cos\psi_1 = 0{,}58$, определим $E_{aq*}/\cos\psi_1 = 0{,}5$ или, переходя к абсолютным единицам измерения, получим $E_{aq}/\cos\psi_1 = 0{,}50\cdot 3468 = 1734$ В. Отложив на продолжении вектора $-j\dot I_1 x_1$ вектор $\dot E_{aq}/\cos\psi_1$ длиной $1734/25 = 69$ мм, получим на векторной диаграмме точку Q. Проведя прямую OQ, получим угол $\psi_1 = 52°$. При этом $\cos\psi_1 = 0{,}616$ и $\sin\psi_1 = 0{,}788$.

8.5. Опустив перпендикуляр из конца вектора $-j\dot I_1 x_1$ на линию OQ, определяем векторы ЭДС $E_{rd} = 147\cdot 25 = 3675$ В и $E_{aq} = 42\cdot 25 = 1050$ В.

8.6. Отложив на оси ординат графика $E_{10*} = f(F_{\delta zc*})$ значения $E_{rd*} = E_{rd}/E_{10ном} = 3675/3468 = 1{,}06$, получим соответствующее значение МДС, равное $F_{rd} = 0{,}90$.

8.7. Магнитодвижущая сила продольной реакции якоря с учетом размагничивающего действия МДС реакции якоря по поперечной оси (8.88)

$$F''_{ad*} = F_{аном*}\left(k_{ad}\,\widetilde{\varkappa}_d \sin\psi_1 + \widetilde{k}\,\frac{\tau}{\delta}\cos\psi_1\right) =$$

$$= 1{,}58\left(0{,}85\cdot 0{,}92\cdot 0{,}788 + 6\cdot 10^{-4}\,\frac{281}{2{,}6}\,0{,}616\right) = 1{,}03.$$

8.8. По графику $\Phi_{m*} = f(F_{\delta zc*})$ (рис. 8.23), отложив на оси абсцисс сумму МДС

$$F_{rd*} + F''_{ad*} = 0{,}90 + 1{,}03 = 1{,}93,$$

найдем значение магнитного потока при нагрузке $\Phi_{mн*} = 1{,}50$, а затем по графику $\Phi_{m*} = f(F'_{p*})$ определим сумму магнитных напряжений в роторе при нагрузке $F_{р,н*} = 1{,}07$.

8.9. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения при нагрузке двигателя на пару полюсов (8.89) в относительных единицах

$$F_{в,н*} = F_{rd*} + F''_{ad*} + F_{р,н*} = 1{,}93 + 1{,}07 = 3{,}0$$

в абсолютных единицах

$$F_{в,н} = F_{в,н*}\, F_{в\,0\,ном} = 3{,}0\cdot 6912 = 20\,736 \text{ А}.$$

9. Обмотка возбуждения

9.1. Принимаем обмотку возбуждения из однослойных полюсных катушек, лобовые части которых имеют форму полуокружности (см. рис. 8.25,*а*).

9.2. Средняя длина витка катушки (8.94)

$$l_{в,ср} = 2\,(l_m - 2c) + \pi\,(b_m + 2\delta_и + b') =$$

$$= 2\,(384 - 2\cdot 15) + \pi\,(118 + 2\cdot 1{,}5 + 14) = 1233 \text{ мм},$$

где $\delta_и = 1{,}5$ мм; $c = 15$ мм, $b' = 0{,}05\,\tau = 0{,}05\cdot 281 = 14$ мм.

9.3. Для питания обмотки возбуждения двигателя принимаем возбудительное устройство типа ТВУ-65-320 (номинальное напряжение 65 В, ток 320 А). Напряжение непосредственно на обмотке возбуждения

$$U_в = 65 - 2 = 63 \text{ В}.$$

9.4. Предварительное значение сечения медного провода полюсной катушки (8.91)

$$q'_в = \rho_{Cu}\, p F'_{в,н}\, l_{в,ср}\cdot 10^3/U_в = 25{,}6\cdot 10^{-9}\cdot 5\cdot 22\,809\cdot 1233\cdot 10^3/63 = 57 \text{ мм}^2,$$

где $\rho_{Cu} = 25{,}6\cdot 10^{-9}$ Ом·м; $F'_{в,н} = 1{,}1\cdot 20\,736 = 22\,809$ А.

9.5. Ток возбуждения (8.96)

$$I_{в,н} = q'_в\,\Delta'_в = 57\cdot 5{,}4 = 308 \text{ А},$$

где $\Delta'_в = 5{,}4$ А/мм^2.

9.6. Число витков в катушке возбуждения (8.97)

$$w_{к,в}=F_{в,н}/2I_{в,н}=20\,736/2\cdot 308=33.$$

9.7. Меньший размер прямоугольного провода полюсной катушки (8.98)

$$a=\frac{h_m-\delta_п}{w_{к,в}+1}-\delta_а=\frac{150-14}{33+1}-0,4=3,6\ мм.$$

9.8. Максимально допустимая ширина провода (8.100)

$$b_{max}=0,5\left[\frac{\pi D_1-2\delta-2h_р-2h_m}{2p}-b_m-2\delta_и-7\right]=$$

$$=0,5\left[\frac{\pi 894-2\cdot 2,6-2\cdot 30-2\cdot 150}{10}-118-2\cdot 1,5-7\right]=19\ мм.$$

9.9. По табл. П.1.2 принимаем провод сечением $q_в=63{,}06$ мм² размерами $a\times в=3{,}53\times 18$ мм.

9.10. Фактическая плотность тока в катушке возбуждения (8.101)

$$\Delta_в=I_{в,н}/q_в=308/63,06=4,9\ А/мм^2.$$

9.11. Превышение температуры полюсной катушки (8.104)

$$\Delta\Theta_в=\frac{0,3\,(2,8+l_1/\tau)\ b\Delta_в^2}{1,6+\sqrt{v_2}}=\frac{0,3\,(2,8+384/281)\cdot 18\cdot 4,9^2}{1,6+\sqrt{27,9}}=78,3\ °C,$$

где $v_2=\pi D_2 n_1/60\cdot 10^3=\pi\cdot 888\cdot 600/60\cdot 10^3=27{,}9$ м/с.

9.12. Уточненное значение высоты полюса (8.105)

$$h_m=(a+\delta_а)\,(w_{к,в}+1)+\delta_п=(3,53+0,4)\,(33+1)+14=147,6\ мм;$$

так как полученное значение h_m отличается от ранее принятого (150 мм) лишь на 1,6 %, то пересчета магнитного напряжения в сердечнике полюса не требуется.

9.13. Активное сопротивление обмотки возбуждения при расчетной температуре (75° C) (8.106)

$$r_в=\rho_{Cu}\,2pw_{к,в}\,l_{в,ср}\cdot 10^3/q_в=21,3\cdot 10^{-9}\cdot 33\cdot 1233\cdot 10^3/63,06=0,137\ Ом.$$

10. Потери и КПД, статическая перегружаемость синхронного двигателя

10.1. Электрические потери в обмотке статора (8.107)

$$P_{э1}=m_1\,I_1^2\,r_1=3\cdot 70,8^2\cdot 0,788=11\,850\ Вт.$$

10.2. Потери на возбуждение (8.108)

$$P_в=I_{в,н}^2\,r_в+\Delta U_щ\,I_{в,н}=(309^2\cdot 0,137+2\cdot 309)=13\,700\ Вт.$$

10.3. Расчетная масса стали зубцового слоя статора (6.4)

$$G_{z1}=7,8\cdot 10^{-6}\left\{\pi/4\left(D_{1н}-2h_c\right)^2-D_1^2\right]-S_{п1}\,Z_1\right\}\,l_i\,k_{c1}=$$

$$=7,8\cdot 10^{-6}\,\{\pi/4\,[(1180-2\cdot 73)^2-894^2]-840\cdot 84\}\,324\cdot 0,95=341\ кг,$$

где площадь паза статора $S_{п1}=b_{п1}h_{z1}=12\cdot 70=840$ мм².

10.4. Расчетная масса стали спинки статора (6.3)

$$G_{c1}=7,8\cdot 10^{-6}\,(\pi/4)\left[D_{1н}^2-(D_1+2h_{z1})^2\right]\,l_i\,k_{c1}=$$

$$=7,8\cdot 10^{-6}\,(\pi/4\,[1180^2-(894+2\cdot 70)^2]\,324\cdot 0,95=607\ кг.$$

10.5. Магнитные потери в зубцах сердечника статора (6.6)

$$P_{мz1}=1,7P_{1,0/50}\,B_{z1}^2\,G_{z1}=1,7\cdot 2,5\cdot 1,36^2\cdot 341=2681\ Вт,$$

где $P_{1,0/50}$ для стали марки 2013 при толщине 0,5 мм равно 2,5 Вт/кг.

10.6. Магнитные потери в спинке сердечника статора (6.5)

$$P_{м,c1}=1,7P_{1,0/50}B_{c1}^2\,G_{c1}=1,7\cdot 2,5\cdot 1,15^2\cdot 607=3405\ Вт.$$

10.7. Магнитные потери в сердечнике статора

$$P_{м1}=P_{мz1}+P_{м,c1}=2681+3405=6086\ Вт.$$

10.8 Механические потери (8.110)

$$P_{мех}\approx 3,68p\left(\frac{v_2}{40}\right)^3\sqrt{l_1\cdot 10^3}=3,68\cdot 5\left(\frac{27,9}{40}\right)^3\sqrt{384\cdot 10^3}=3912\ Вт.$$

10.9 Добавочные поверхностные потери в полюсных наконечниках ротора (8.111)

$$P_п=k_п\,pb_р\,l_1\left(Z_1\,n_1\cdot 10^{-4}\right)^{1,5}\left[B_{\delta ном}\left(k_{\delta 1}-1\right)\,t_1\right]^2\cdot 10^6=$$

$$=4,6\cdot 5\cdot 197\cdot 384\,(84\cdot 600\cdot 10^{-4})^{1,5}\,[0,82\,(1,34-1)\cdot 33,4]^2\cdot 10^{-6}=707\ Вт.$$

10.10. Добавочные потери при номинальной нагрузке двигателя

$$P_{доб}=0,005\,P'_{1ном}\cdot 10^3=0,005\cdot 666\cdot 10^3=3330\ Вт,$$

где предварительное значение подводимой мощности в номинальном режиме

$$P'_{1ном}=P_{ном}/\eta'_{ном}=630/0,946=666\ кВт.$$

10.11. Общие потери в номинальном режиме работы двигателя (8.112)

$$\Sigma P=(P_{э1}+P_в+P_{м1}+P_{мех}+P_п+P_{доб})\cdot 10^{-3}=$$

$$=(11\,850+13\,700+6086+3912+707+3330)\cdot 10^{-3}=39,6\ кВт.$$

10.12. КПД двигателя при номинальной нагрузке (8.114)

$$\eta=1-\Sigma P/P_{1ном}=1-39,6/669,6=0,94,$$

где $P_{1ном}=P_{ном}+\Sigma P=630+39{,}6=669{,}6$ кВт.

10.13. Статическая перегружаемость двигателя (8.119)

$$M_{max}=\frac{E''_{10*}\,k_р}{x_{d*}\cos\varphi_1}=\frac{2,9\cdot 1,02}{1,51\cdot 0,9}=2,175,$$

где $E''_{10*}=2{,}9$ по рис. 8.26 при $F_{в,н*}=2{,}55$;

$$\xi=(x_{d*}-x_{q*})/x_{q*}\,E''_{10*}=(1,51-0,934)/(0,934\cdot 2,9)=0,212;$$

по рис. 8.27 при $\xi=0{,}212$ $K_р=1{,}02$.

11. Тепловой расчет

11.1 Превышение температуры поверхности сердечника статора над температурой охлаждающего воздуха (8.120)

$$\Delta\Theta_{пов1}=\frac{P_{э1}\,(2l_1/l_{ср1})+P_{м1}}{\pi D_1 l_1\alpha_1\,(1+0,1v_2)}=\frac{11\,850\,(2\cdot 384/1594)+6086}{\pi\cdot 894\cdot 384\cdot 8\cdot 10^{-5}\,(1+0,1\cdot 27,9)}=38\ °C;$$

при $l_1/\tau=384/282=1{,}37$ $\alpha_1=8\cdot 10^{-5}$.

11.2. Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора (6.94)

$$\Delta\Theta_{из1}=\frac{k_\Theta\,P_{э1}\,(2l_1/l_{ср1})}{Z_1\Pi_1 l_1}\,\frac{C_{п1}}{\lambda_{экв}}=\frac{1,15\cdot 11\,850\,(2\cdot 384/1594)}{84\cdot 164\cdot 384}\,\frac{3,6}{16,5\cdot 10^{-5}}=28\ °C,$$

где $\Pi_1 = 2(h_{z1} + в_{п1}) = 2(70+12) = 164$ мм; $C_{п1}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу статора (см. табл. 8.6): $C_{п1} = 3{,}6$ мм; для изоляции класса нагревостойкости В $\lambda_{экв} = 16 \cdot 10^{-5}$ Вт/(мм·° С); $\kappa_\Theta = 1{,}15$.

11.3. Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя (8.121)

$$\Delta\Theta_{л1} = \frac{A_1 \Delta_1 t_1 \rho_{Cu} \cdot 10^6}{13{,}3\,(1 + 0{,}07 v_2)\,\Pi_{л1}} = \frac{467 \cdot 10^2 \cdot 5{,}38 \cdot 33{,}4 \cdot 21{,}3 \cdot 10^{-9} \cdot 10^6}{13{,}3\,(1 + 0{,}07 \cdot 27{,}9) \cdot 164} = 28\ ^\circ\mathrm{C},$$

где $\Pi_{л1} = \Pi_1 = 164$ мм.

11.4. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды (8.122)

$$\Delta\Theta_1 = [(\Delta\Theta_{из1} + \Delta\Theta_{пов1})\, l_1 + (\Delta\Theta_{из1} + \Delta\Theta_{л1})\, l_1]\, 2/l_{ср1} =$$

$$= [(28 + 38{,}0) \cdot 384 + (28 + 28) \cdot 393]\, \frac{2}{1594} = 59{,}3\ ^\circ\mathrm{C},$$

что не превышает допустимое превышение температуры обмотки статора при классе нагревостойкости изоляции В (80° С) по ГОСТ 183-74.

Глава девятая

КОНСТРУИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ ЯВНОПОЛЮСНЫХ МАШИН

9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Принципы конструирования электрических машин, изложенные в гл. 7 применительно к асинхронным двигателям, следует использовать и при конструировании синхронных машин. Основное конструктивное отличие синхронных машин от асинхронных обусловлено разным устройством их роторов. Что же касается статоров, то они не отличаются друг от друга, поэтому при конструировании синхронных машин до 15-го габарита включительно можно воспользоваться рекомендациями по конструированию статоров подшипниковых щитов асинхронных двигателей защищенного исполнения (см. § 7.2, 7.3, 7.6). При расчете вала и выборе подшипников качения следует также руководствоваться рекомендациями § 7.5 и 7.7.

В настоящей главе рассмотрены вопросы конструирования синхронных машин 16-го и более габаритов ($D_{1н} \geqslant 1180$ мм). При конструировании трехфазных синхронных машин общего назначения в качестве базовой модели следует принять соответствующую машину новой серии, например серий СГ2, СД2, СДН2, СДН32. Устройство и технические данные некоторых типоразмеров машин этих серий рассмотрены в § 8.1.

9.2. СТАНИНА, СТАТОР И ЩИТЫ

Станины явнополюсных синхронных машин 16-го и более габаритов сваривают из листовой стали (рис. 9.1). Такая станина со-

стоит из стоек, соединенных между собой ребрами жесткости, опорных лап и наружной обшивки. Стойки и наружная обшивка образуют кольцевой короб П-образного сечения. При большой длине станины в дополнение к боковым стойкам применяют промежуточные, количество которых должно быть таким, чтобы расстояние между двумя соседними стойками было не более 450—500 мм.

В лапах станины предусмотрены отверстия для крепления ее к фундаменту, а также резьбовые отверстия для отжимных болтов.

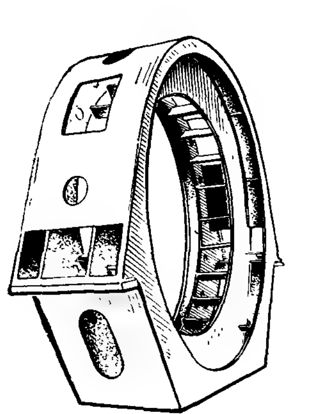


Рис. 9.1. Сварная станина синхронной машины

Рис. 9.2. Крепление сердечника статора в сварной станине

У машин закрытого исполнения с замкнутым циклом вентиляции в нижней части станины предусмотрены отверстия для ввода и вывода охлаждающего воздуха. В машинах защищенного исполнения вентиляционные отверстия делают в обшивке.

Станина снабжается болтами для присоединения заземляющих шин. Для удобства транспортирования машины больших габаритов имеют разъемные станины. Это усложняет конструкцию, так как необходимо делать разъемным и сердечник статора с обмоткой. Поэтому вопрос о разъемной конструкции статора определяется исключительно требованиями к габаритам машины со стороны транспортных средств, предполагаемых для доставки машины на место ее установки. Центровка сегментов и сердечника статора *1* в целом ведется на ребрах *6* (рис. 9.2). После сборки и опрессовки сердечник статора закрепляется путем затяжки гаек на стяжных шпильках *3*. Затем гайки приваривают с одной стороны к глухой стойке *7* станины, а с другой—к нажимному кольцу *4*, которое приваривают прерывистым швом к стойке *5*.

Для предотвращения распушения зубцов в пакетах статора применяют нажимные пальцы *2* — стальные пластины прямоугольного или двутаврового профиля. В некоторых конструкциях не-

сколько нажимных пальцев *1* приваривают к общей пластине *2*, при этом образуются нажимные гребенки (рис. 9.3).

Радиальные вентиляционные каналы между пакетами сердечника статора шириной 10 мм создают установкой распорок (ветрениц), которые приваривают к крайним листам пакетов (рис. 9.4, *а*). Обычно эти распорки имеют двутавровое сечение (рис. 9.4, *б*). Крайние листы сердечника статора штампуют из более толстых

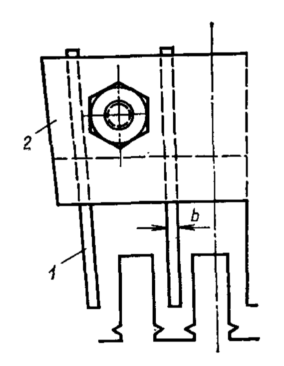


Рис. 9.3. Нажимная гребенка

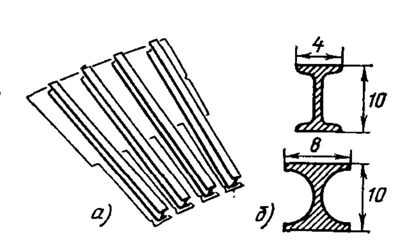


Рис. 9.4. Вентиляционные распорки

стальных листов или две пластины толщиной по 0,5 мм сваривают вместе точечной сваркой.

При конструировании статора необходимо определить размеры и количество стяжных шпилек $n_{ш,с}$ из расчета полного усилия запрессовки сердечника статора, Н,

$$Q_с = q_с \cdot 10^{-6}\left\{(\pi/4)\left[1-\left(\frac{D_1}{D_{1н}}\right)^2\right]D_{1н}^2 - S_п Z_1\right\}, \qquad (9.1)$$

где $S_п$ — площадь сечения паза статора, мм².

Давление в запрессованном сердечнике не должно превышать $q_с = 0{,}7 \div 7{,}0$ МПа. При чрезмерно большом давлении возрастают магнитные потери в сердечнике.

Требуемое число стяжных шпилек

$$n_{ш,с} = Q_с \cdot 10^6/\sigma S_{о,ш}, \qquad (9.2)$$

где σ — допустимое напряжение: для стали марки Ст3 $\sigma = 160$ МПа, а для стали марки Ст5 $\sigma = 210$ МПа; $S_{о,ш}$ — площадь сечения шпильки в основании резьбы, мм²:

$$S_{о,ш} = \pi d_{о,ш}^2/4; \qquad (9.3)$$

$d_{о,ш}$ — диаметр шпильки в основании резьбы, мм.

Полученное по (9.2) число округляют до ближайшего большего числа, кратного числу сегментов.

Пример. Для синхронного двигателя, расчет которого приведен в § 8.14 ($D_{1н} = 1180$ мм, $D_1 = 894$ мм; $Z_1 = 84$; $S_п = 12 \cdot 70 = 840$ мм²; число сегментов 6), определить число и размеры стяжных шпилек.

Решение. Принимаем давление запрессовки $q_с = 1$ МПа. Полное усилие запрессовки (9.1)

$$Q_с = 1 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}\left\{(\pi/4)\left[1-\left(\frac{894}{1180}\right)^2\right] \cdot 1180^2 - 840 \cdot 84\right\} = 4{,}0 \cdot 10^5 \text{ Н}.$$

Выбираем шпильку М20 из стали Ст3: $d_{о,ш} = 16{,}7$ мм,

$$S_{о,ш} = \pi d_{о,ш}^2/4 = \pi \cdot 16{,}7^2/4 = 219 \text{ мм}^2.$$

Число стяжных шпилек (9.2)

$$n_{ш,с} = Q_с \cdot 10^6/\sigma S_{о,ш} = 4{,}0 \cdot 10^5 \cdot 10^6/160 \cdot 10^6 \cdot 219 = 11{,}68.$$

Принимаем число стяжных шпилек $n_{ш,с} = 12$, при этом каждый пакет сегментов закрепляется двумя шпильками.

Для крепления лобовых частей обмотки статора применяют бандажные кольца (рис. 9.5). Необходимость такого крепления обусловлена возможностью возникновения при внезапных коротких замыканиях машины значительных электродинамических сил, действующих на лобовые части обмотки статора. Эти силы отжимают

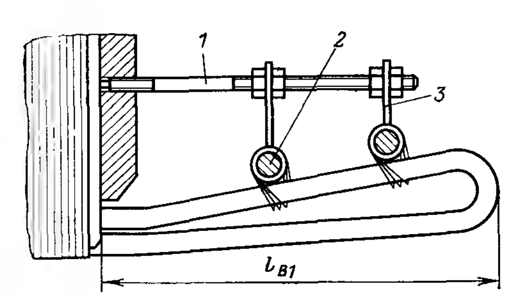


Рис. 9.5. Крепление лобовой части обмотки статора к бандажным кольцам

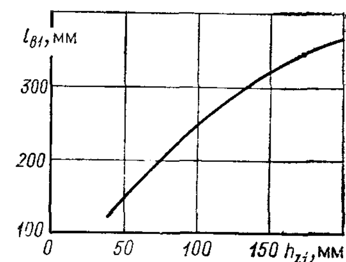


Рис. 9.6. К определению числа бандажных колец

лобовые части обмотки к торцевой плоскости сердечника статора. При этом бандажные кольца испытывают растягивающие усилия. Бандажные кольца изготавливают из стальных прутков круглого или прямоугольного сечения. В машинах с внутренним диаметром сердечника статора более 1000 мм бандажные кольца *2* закрепляют на шпильках *1* посредством приваренных к бандажным кольцам петель *3*.

Количество шпилек $c_{ш,б}$, устанавливаемых по периметру бандажного кольца, принимают в зависимости от наружного диаметра сердечника статора $D_{1н}$:

$D_{1н}$, мм	До 2000	2000—2600	Свыше 2600
$c_{ш,б}$	4	6	8

Необходимое число бандажных колец определяют по рис. 9.6, где $l_{в1}$ — длина вылета лобовой части обмотки статора, а h_{z1} — высота паза сердечника статора. Если точка с координатами $l_{в1}$ и h_{z1} лежит выше кривой, то установка бандажных колец необходима.

Число бандажных колец $c_{б,к}$ определяется из расчета одно бандажное кольцо на каждые 100 мм вылета лобовой части сверх значения, ограниченного кривой рис. 9.6, при заданном значении высоты паза h_{z1}.

Диаметр прутка для бандажного кольца, мм,

$$d_{б,к} = 60D_1/0{,}25p\sqrt{\sigma c_{б,к}}. \qquad (9.4)$$

Для изготовления бандажных колец применяют стальные прутки диаметрами 10, 12, 16, 20 и 24 мм, или же прутки квадратного сечения 22×22 или 32×32 мм^2.

Пример. Для синхронного двигателя с $2p=12$; $D_1=1660$ мм; $h_{z1}=90$ мм; $l_{в1}=270$ мм определить требуемое число бандажных колец и их сечение.

Решение. На рис. 9.6 точка с координатами $l_{в1}=270$ мм и $h_{z1}=90$ мм расположена выше кривой на 38 мм, поэтому для крепления лобовых частей требуется по одному бандажному кольцу с каждой стороны статора ($c_{б,к}=1$). Диаметр прутка из стали марки Ст3 для изготовления бандажного кольца (9.4)

$$d_{б,к} = 60\cdot 1660/0{,}25\cdot 6\sqrt{1\cdot 160\cdot 10^6} = 5{,}18 \text{ мм}.$$

Принимаем $d_{б,к}=10$ мм. Так как $1000<D_{1н}<2000$ мм, то для крепления каждого бандажного кольца применяем четыре шпильки ($c_{ш,б}=4$).

Щиты в синхронных явнополюсных машинах со стояковыми подшипниками плоские, сварные из листовой стали (см. рис. 8.4). Если станина машины разъемная, то и щиты имеют разъем по линии разъема станины.

В машинах 17-го и более габаритов для придания щитам жесткости к их внешней поверхности приваривают уголки, выполняющие функцию ребер жесткости.

В зависимости от степени защиты в щитах либо делают окна, прикрытые жалюзи, либо снабжают щиты патрубками для ввода в машину охлаждающего воздуха, либо делают их глухими. В машинах закрытого исполнения места прилегания щитов к станине, патрубков к щитам, а также места разъема уплотняют.

9.3. ПОДШИПНИКИ СКОЛЬЖЕНИЯ

В синхронных явнополюсных машинах средней и большой мощности с горизонтальным расположением вала, например машинах на базе серий СДН2, СДН32 и др., применяются подшипники скольжения. При этом подшипниковые узлы выполняются стояковыми, т. е. вынесенными из щитов и установленными на фундаментной плите вместе со статором машины. В целях устранения подшипниковых токов, разрушающих подшипники, один из подшипников (обычно со стороны, противоположной приводу) электрически изолируют от станины. Для подшнипников скольжения применяют кольцевую смазку (ПК) или комбинированную смазку (КПК): кольцевую и принудительную.

На рис. 9.7 показано устройство стоякового подшипника с кольцевой смазкой (ПК). Литой чугунный корпус состоит из стояка *1* и крышки *2*. Вкладыш *3* подшипника разъемный, а его внутренняя

поверхность залита антифрикционным сплавом — баббитом *10*. Верхняя часть вкладыша имеет две радиальные прорези, так что два смазочных латунных кольца *4*, имеющих диаметр, мм,

$$D_{с,к} = 1{,}6\, d_2 + 10 \qquad (9.5)$$

и ширину, мм,

$$b_{с,к} = 1{,}6\sqrt{d_2}, \qquad (9.6)$$

через эти прорези свободно лежат на шейке вала диаметров d_2.

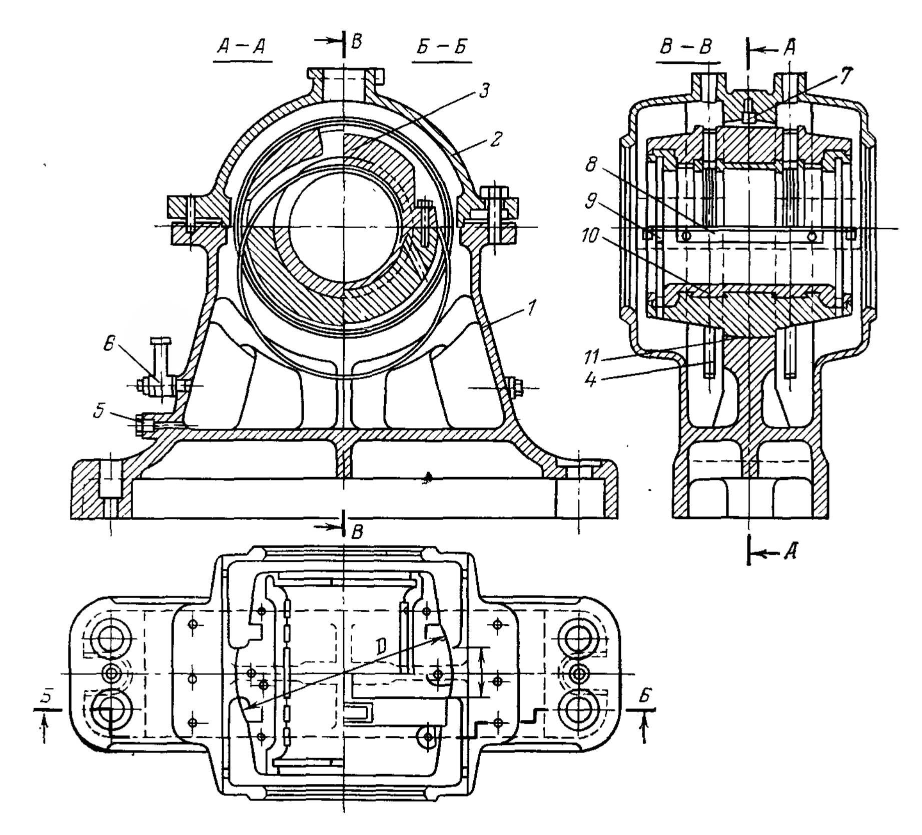


Рис. 9.7. Стояковый подшипник с кольцевой смазкой

Смазка подшипника происходит следующим образом: масло, находящееся в нижней полости корпуса подшипника, при вращении шейки вала увлекается смазочными кольцами в верхнюю часть подшипника и через радиальные прорези в верхней половине вкладыша попадает на шейку вала, а затем по продольным канавкам *8* растекается по всей длине подшипника, попадая под шейку вала в нижнюю часть вкладыша.

Для предотвращения вытекания масла из подшипника разъем вкладыша сделан несколько выше разъема корпуса подшипника.

В верхней части подшипника имеется стопорный винт 7, удерживающий вкладыш от проворачивания при вращении вала машины.

По способу установки вкладыша в корпусе подшипники скольжения разделяются на подшипники с жесткой посадкой вкладыша и подшипники с самоустанавливающимся вкладышем на сферической опоре. Подшипники с жесткой посадкой вкладыша применяют лишь в машинах с коротким валом и небольшой частотой вращения. Более широкое применение получили подшипники с самоустанавливающимся вкладышем, так как они исключают возникновение перекоса вала в машине. Происходит это вследствие того, что поверхность *11* прилегания вкладыша к стояку имеет шаровую форму с центром по оси шейки вала и при возникновении перекоса вкладыш перемещается на шаровой опоре и занимает положение строго по оси вала.

Для контроля за уровнем масла в корпусе подшипника имеется штуцер *6* со стеклянной трубкой. Старое масло удаляется из подшипника через сливную пробку *5*. Для предотвращения растекания масла вдоль вала за пределы подшипника на концах вкладыша сделаны маслоулавливающие кольцевые канавки *9* с отверстиями в нижней части. Масло растекаясь вдоль вкладыша, собирается в этих канавках и стекает в нижнюю часть корпуса подшипника. Предотвращению растекания масла из подшипника также служат лабиринтные уплотнения в местах выхода вала из подшипника. В подшипниках с кольцевой смазкой обычно применяют турбинное масло марки 30.

Подшипники с комбинированной смазкой (КПК) отличаются от подшипников с кольцевой смазкой (КП) наличием трубопровода для принудительной подачи смазки под давлением. Такие подшипники обычно применяют в быстроходных машинах при значительных нагрузках на подшипник. Для смазки подшипников типа КПК применяют турбинное масло марок 22 или 30.

Для контроля температуры вкладышей в подшипниках применены термосигнализаторы или термометры сопротивления.

Требуемые размеры подшипников скольжения (внутренний диаметр×длина) определяют по радиальной нагрузке на подшипник и частоте вращения, пользуясь табл. 9.1. Следует иметь в виду, что подшипники с размерами, расположенными выше утолщенной линии, могут иметь только кольцевую смазку, а подшипники с размерами, расположенными ниже утолщенной линии, — комбинированную смазку.

Радиальные нагрузки на подшипники *А* и *В* (см. рис. 7.10) определяют по формулам (7.36) и (7.24), а силу тяжести (вес) ротора, Н, — по формуле

$$F_2 = 9{,}81 G_2, \qquad (9.7)$$

где G_2 — масса ротора, кг:

$$G_2 = G_m + G_{об} + G_{мm} + G_{м,ст} + G_{м,к} + G_в; \qquad (9.8)$$

Таблица 9.1

Размеры, мм	Допустимые радиальные нагрузки на подшипники, кН, при частоте вращения, об/мин								
	125	150	300	375	500	600	750	1000	1500
100×130	—	—	—	—	10,0	11,0	12,0	14,0	16,0
110×130	—	—	—	10,0	12,0	13,0	14,0	16,0	19,0
120×140	—	—	—	12,5	14,5	15,5	17,0	20,0	24,0
130×140	—	—	12,0	14,0	16,0	17,5	19,0	22,5	26,0
140×150	—	—	14,5	16,5	18,5	20,5	22,5	26,0	30,0
150×150	—	—	16,0	18,0	20,5	22,5	24,0	28,0	32,5
160×160	—	—	18,5	20,5	23,5	25,5	28,0	32,0	—
180×180	—	—	24,5	27,0	31,0	33,5	37,0	42,0	—
200×200	—	—	31,5	34,5	39,0	42,0	47,0	53,0	—
220×220	—	—	39,5	43,0	48,5	54,0	59,0	66,0	—
250×250	—	—	53,5	58,0	66,0	72,0	79,0	—	—
280×280	—	53,5	71,5	77,5	87,5	94,0	104	—	—
300×300	—	63,0	84,5	91,0	103	111	122,5	—	—
350×350	85,0	91,0	122	134	150	160	—	—	—
400×400	115	125	166	182	208	224	—	—	—
450×450	155	165	220	241	256	273	—	—	—
500×500	200	205	290	320	340	—	—	—	—

здесь G_m — масса стали полюсов ротора, кг:

$$G_m = 7{,}8\cdot10^{-6}\, l_m\, 2pk_{cm}(h_m b_m + 0{,}8h_р b_р); \qquad (9.9)$$

$G_{об}$ — масса обода, кг:

$$G_{об} = 7{,}8\cdot10^{-6}(\pi/4)\, l_{об}\left[(D_1 - 2\delta - 2h_m - 2h_р)^2 - \pi d_в^2\right]; \qquad (9.10)$$

$G_{мm}$ — масса обмотки возбуждения, кг:

$$G_{мm} = 8{,}9\cdot10^{-6}\cdot1{,}05 q_в\, l_{в,ср}\cdot 2pw_{к,в}; \qquad (9.11)$$

$G_{м,ст}$ — масса меди стержней пусковой клетки, кг:

$$G_{м,ст} = 8{,}9\cdot10^{-6} q_2\cdot 2pN_2 l_{ст}; \qquad (9.12)$$

$G_{м,к}$ — масса меди короткозамыкающих сегментов, кг:

$$G_{м,к} = 8{,}9\cdot10^{-6} q_к\, \pi\, (D_1 - 2\delta - 2h_{ш2} - d_2); \qquad (9.13)$$

$G_в$ — масса вала на участке посадки ротора, кг:

$$G_в = 7{,}8\cdot10^{-6}(\pi/4)\, d_в^2\, l_{об}. \qquad (9.14)$$

9.4. РОТОР

Наиболее важным при конструировании явнополюсного ротора является выбор способа и расчет крепления полюсов на ободе. Ес-

ли обод цельный (в виде стальной втулки) либо сварной из листовой стали Ст3, то крепление полюсов ротора к ободу осуществляется болтами (винтами). В машинах небольшой мощности болты (винты) пропускают через отверстие в полюсе со стороны полюсного наконечника и вворачивают в резьбовое отверстие в ободе (рис. 9.8, *а*). В машинах средней и большой мощности болты, крепящие полюс, вставляются с внутренней стороны обода и вворачиваются в резьбовое отверстие в стержне, вставленном в осевое отверстие в полюсе (рис. 9.8, *б*). В этом случае обод ротора выполняют сварным из толстых стальных листов. Такая конструкция обода называется магнитным колесом и состоит из собственно обода *1*, диска *2* и ступицы *3* (рис. 9.9). Чтобы исключить возможное удлинение крепежных болтов под действием центробежных сил, возникающих при вращении ротора, болты устанавливают с предварительным натягом.

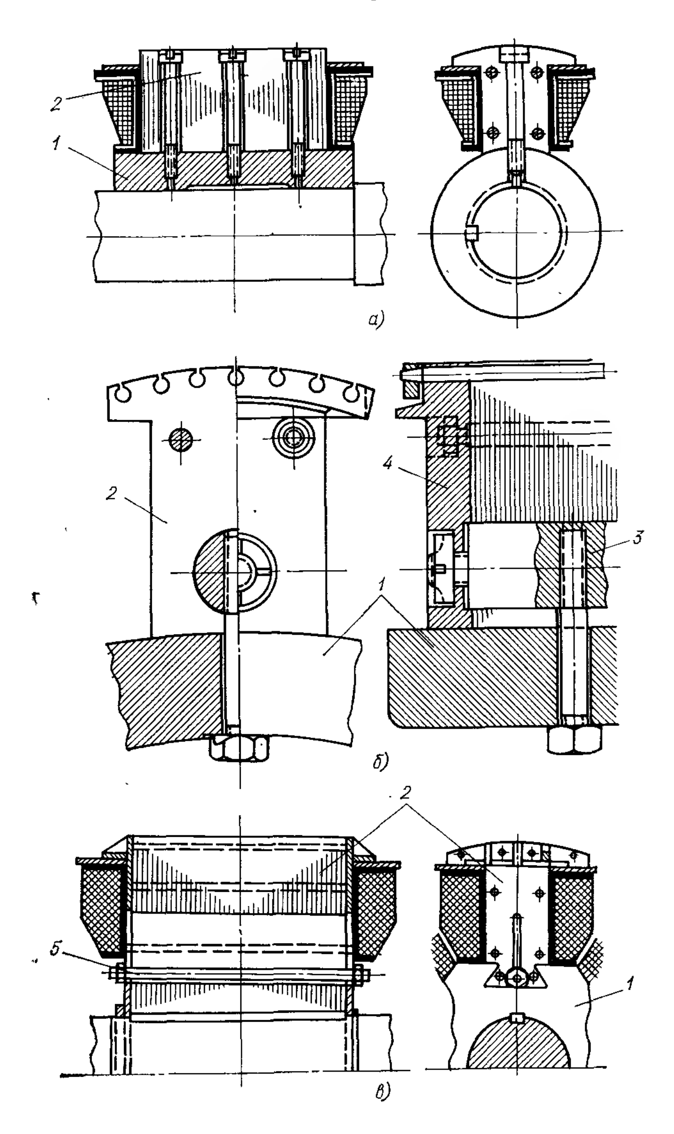


Рис. 9.8. Способы крепления полюсов ротора:

а и *б* — болтами; *в* — посредством ласточкина хвоста; *1* — обод; *2* — сердечник полюса; *3* — стержень; *4* — нажимная щека; *5* — шпилька

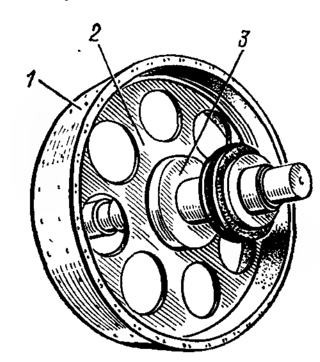


Рис. 9.9. Обод ротора тихоходной синхронной машины

Если обод ротора шихтованный, то крепление полюса в машинах небольшой мощности выполняется посредством ласточкина хвоста (рис. 9.8, *в*). Иногда для расклинивания ласточкина хвоста в последнем делают отверстие, в которое вставляют шпильку *5* с небольшой конусностью. Более технологично крепление полюсов ротора к шихтованному ободу посредством Т-образных хвостов (см. рис. 8.13), заклиниваемых двумя парами стальных шпонок (клиньев) прямоугольного сечения. Такое крепление полюсов обычно применяют при $2p=6\div12$.

Для предотвращения распушения шихтованных сердечников полюсов их стягивают шпильками. В некоторых конструкциях синхронных машин каждый полюс с обоих торцов имеет нажимные щеки из кованой стали или стального литья с отверстиями для стяжных шпилек (см. рис. 9.8, *б*).

Расчет крепления полюса к ободу ведут по центробежной силе, действующей на полюс, Н,

$$F_ц = 11 G_п R_{ц,т} (n_{max}/1000)^2, \qquad (9.15)$$

где $G_п$ — масса одного полюса с катушкой и пусковой обмоткой, кг:

$$G_п = (G_m + G_{мm} + G_{м.ст} + G_{м.к})/2p; \qquad (9.16)$$

$R_{ц,т}$ — средний радиус центра тяжести полюса, мм:

$$R_{ц,т} = 0{,}5\,[D_1 - (2\delta_{ср} + h_m + h_р)]; \qquad (9.17)$$

n_{max} — максимальная частота вращения ротора (об/мин), для синхронных машин общего назначения принимают $n_{max}=1{,}2\,n_1$.

Расчет крепления полюса болтами (винтами). Количество крепящих болтов должно быть не менее двух. Площадь сечения болта в основании резьбы, мм²,

$$S_0 = 1{,}25 F_ц \cdot 10^6 / n_{б,п}\,\sigma, \qquad (9.18)$$

где $n_{б,п}$ — количество болтов на один полюс; σ — допускаемое напряжение при растяжении болта, Па: для стали марки Ст3 $\sigma = 160$ МПа, а для стали марки Ст5 $\sigma = 200$ МПа.

Диаметр крепящего болта в основании резьбы, мм,

$$d_0 = 2\sqrt{S_0/\pi} = 1{,}3\cdot 10\sqrt[3]{F_ц/n_{б,п}\sigma}. \qquad (9.19)$$

Окончательно принимают ближайшее большее стандартное значение d_0. Диаметр болта не должен превышать 50 мм.

Пример. Для синхронного двигателя, расчет которого приведен в § 8.12 определить диаметр крепящих полюсы болтов при частоте вращеиня

$$n_{max} = 1{,}2\cdot 600 = 720 \text{ об/мин}.$$

Решение. Масса стали полюсов ротора (9.9)

$$G_m = 7{,}8\cdot 10^{-6}\cdot 384\cdot 10\cdot 0{,}95\,(150\cdot 118 + 0{,}8\cdot 30\cdot 197) = 622 \text{ кг}.$$

Масса обомотки возбуждения (9.11)

$$G_{Mm} = 8{,}9\cdot 10^{-6}\cdot 1{,}05\cdot 63{,}06\cdot 1233\cdot 10\cdot 33 = 239 \text{ кг}.$$

Масса меди стержней пусковой обмотки (9.12)

$$G_{М,ст} = 8{,}9\cdot 10^{-6}\cdot 113\cdot 10\cdot 7\cdot 468 = 33 \text{ кг}.$$

Масса меди короткозамыкающих сегментов (9.13)

$$G_{М,к} = 8{,}9\cdot 10^{-6}\cdot 429{,}1\pi\,(894 - 2\cdot 3 - 2\cdot 2 - 12) = 10{,}5 \text{ кг}.$$

Масса одного полюса (9.16)

$$G_п = (622 + 239 + 33 + 10{,}5)/10 = 90{,}5 \text{ кг}.$$

Средний радиус центра тяжести (9.17)

$$R_{п,т} = 0{,}5\,[894 - (2\cdot 3{,}3 + 150 + 30)] = 353{,}7 \text{ мм}.$$

Центробежная сила (9.15)

$$F_ц = 11\cdot 90{,}5\cdot 353{,}7\,(720\cdot 10^{-3})^2 = 182\cdot 10^3 \text{ Н}.$$

Принимаем два болта из стали Ст5 на один полюс.
Диаметр одного болта в основании резьбы (9.19)

$$d_0 = 1{,}3\cdot 10^3\sqrt{182\cdot 10^3/2\cdot 200\cdot 10^6} = 27{,}5 \text{ мм}.$$

Принимаем болты М36 (d_0=31.67 мм).

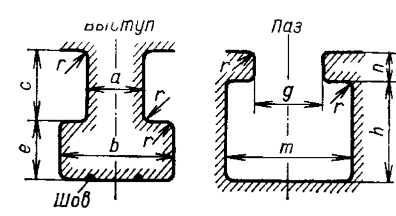


Рис. 9.10. Размеры Т-образного хвостовика и паза

Расчет крепления полюсов Т-образными хвостовиками. Определяют удельную центробежную силу, действующую на 1 мм длины полюса, Н/мм,

$$f_ц = F_ц/l_m. \qquad (9.20)$$

Затем по табл. 9.2 выбирают номер габарита Т-образного хвостовика. В табл. 9.2 также указаны размеры Т-образного выступа на полюсе и соответствующего ему паза на ободе по рис. 9.10.

Таблица 9.2

Номер габарита	Размеры выступа, мм (рис. 9.10, *а*)					Размеры паза, мм (рис. 9.10, *б*)				*k*	Толщина листа, мм	Допустимая нагрузка, Н/мм. Хвостовик	
	a	*b*	*c*	*e*	*r*	*q*	*m*	*h*	*n*			не проварен	проварен
1	12	24	24	12	1	14	26	25	12	—	0,5 1	440 590	590 980
2	20	40	38	20	1,5	22	42	40	20	—	1 1,5	790 1470	1080 1960
3	26	52	50	25	1,5	29	55	52	25	80	1 1,5	690 2060	1080 2750
4	32	65	58	32	1,5	35	69	60	32	98	1 1,5	610 2160	1280 2850
5	38	70	58	32	1,5	42	74	60	32	110	1 1,5	520 2450	1170 3340

Для увеличения механической прочности шихтованного хвостовика его нижнюю грань иногда проваривают непрерывным швом по специальным лункам. При значительной центробежной силе возможно применение на одном полюсе двух Т-образных хвостовиков.

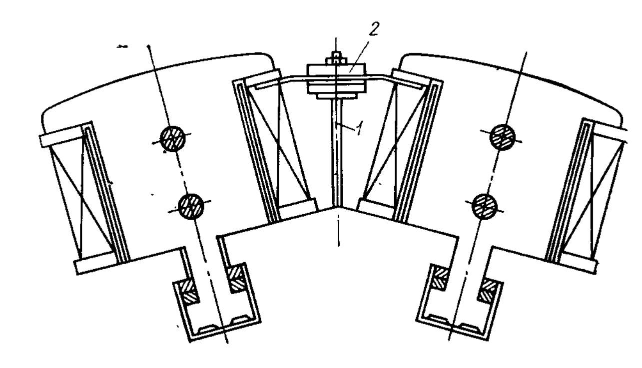


Рис. 9.11. Крепление межполюсного соединения катушек возбуждения

В этом случае удельная нагрузка на каждый хвостовик принимается вдвое меньшей, а расстояние между осями хвостовиков принимают равным k (табл. 9.2). Закрепление Т-образных выступов в пазах остова выполняется посредством четырех клиньев (по два с каждой стороны), изготовленных из шпоночной стали, с уклоном 1 : 100 (см. рис. 8.13).

Полюсные катушки синхронных машин электрически соединяют между собой гибкими проводниками. В машинах средней и большой мощности для этой цели используют пакеты листовой

бронзы, припаянные к крайним виткам катушек. Площадь контактной поверхности соединения должна быть не меньше 10-кратной площади поперечного сечения обмоточного провода полюсной катушки.

В быстроходных машинах межполюсные соединения для компенсации центробежных сил удерживаются специальными креплениями (рис. 9.11), состоящими из шпильки *1*, изоляционной трубки и двух гетинаксовых шайб *2*, служащих для электрической изоля-

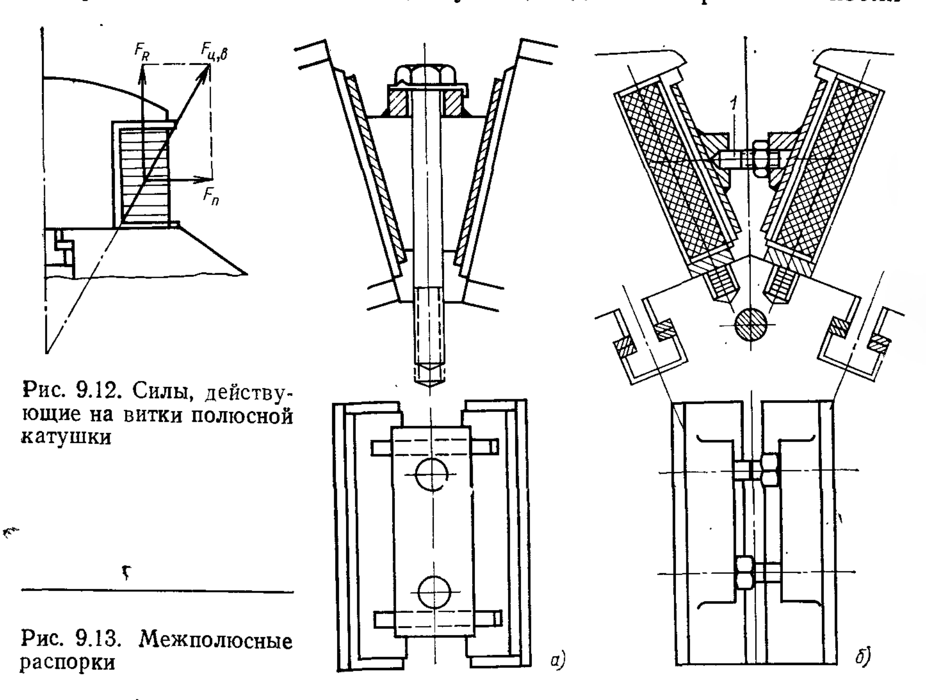


Рис. 9.12. Силы, действующие на витки полюсной катушки

Рис. 9.13. Межполюсные распорки

ции соединения от шпильки. В тихоходных машинах крепления межполюсных соединений обычно не применяют.

При вращении ротора каждый виток полюсной катушки испытывает действие центробежной силы $F_{ц,в}$ (рис. 9.12). Направление этой силы определяется радиусом, проведенным из центра вращения ротора через центр тяжести витка катушки. Разложим силу $F_{ц,в}$ на две составляющие — радиальную F_R, направленную по оси полюса, и нормальную F_n, направленную перпендикулярно оси полюса.

Составляющая F_R воспринимается полюсным наконечником и передается на элементы крепления полюса к ободу, а нормальная составляющая F_n стремится отогнуть виток катушки в межполюсное пространство. При этом в меди витка возникают механические напряжения, которые возрастают с увеличением длины машины и частоты вращения ротора. Для компенсации действия нормальных сил F_n на роторе устанавливают межполюсные распорки.

Существует несколько конструкций межполюсных распорок. Наибольшее распространение получили два вида распорок: распорка, укрепляемая винтами к ободу (рис. 9.13, *а*), и распорка с расклинивающими шпильками *1* (рис. 9.13, *б*). Последний вид распорок применяют при небольшом межполюсном расстоянии, при этом распорки устанавливают таким образом, чтобы их стенки упирались в выступы полюсных наконечников. Необходимо иметь в виду, что применение распорок, прикрывающих часть поверхности полюсных катушек, ухудшает охлаждение машины, особенно обмотки возбуждения.

9.5. КОНТАКТНЫЕ КОЛЬЦА

Для токоподвода к вращающейся обмотке ротора в синхронных машинах применяют два контактных кольца. Различают две конструктивные формы узла контактных колец: контактные кольца на втулке и контактные кольца консольного типа.

Узел контактных колец на втулке (рис. 9.14) состоит из чугунной втулки *1*, покрытой в несколько слоев формовочным миканитом *2*. На втулку в горячем состоянии (300—400 °С) насаживают два контактных кольца *3*.

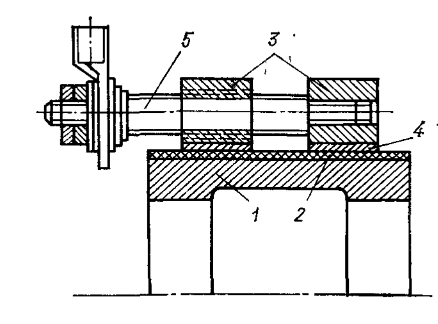


Рис. 9.14. Узел контактных колец на втулке

В зависимости от условий работы машины контактные кольца

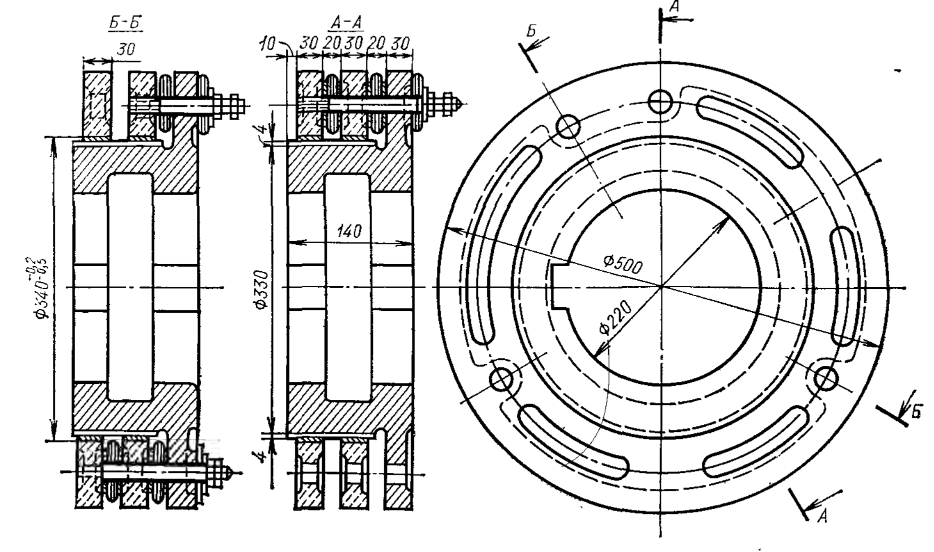


Рис. 9.15. Узел контактных колец на втулке с фланцем

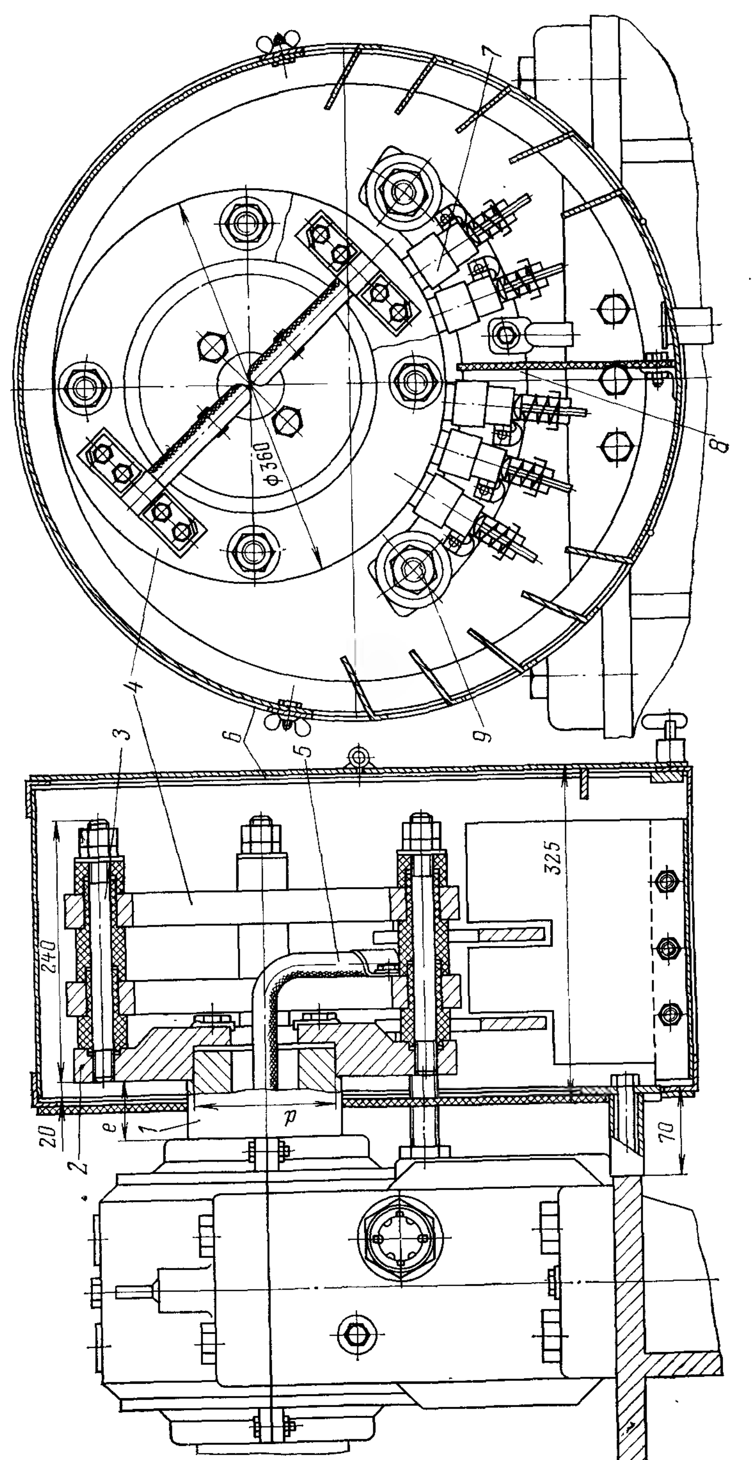


Рис. 9.16. Узел контактных колец консольного типа

изготавливают из стали, чугуна, латуни или меди. В ответственных случаях слой миканита перед посадкой колец армируется листовой сталью *4*. Из каждого кольца в сторону сердечника ротора выводят по одной или две медные шпильки *5*. Шпильки, проходящие сквозь одно из колец, изолируются от него втулкой из микафолия.

На рис. 9.15 показано устройство узла контакных колец на чугунной втулке с фланцем. Такая конструкция узла является более надежной, так как исключает возможность осевого смещения колец.

При небольшом диаметре контактных колец (до 100 мм) целесообразно кольца и выводные пластины запрессовывать в пластмассовую втулку. Узел контактных колец на втулке устанавливают на вал машины между сердечником ротора и подшипником. Для предотвращения проворачивания втулки на валу применяют посадку втулки на шпонку.

Узел контактных колец консольного типа применяют в большинстве современных серий синхронных явнополюсных машин. Узел прикрепляют к торцу вала *1* машины (рис. 9.16). Для закрепления контактных колец *4* используются фланец *2* и четыре шпильки *3*. Для электрической изоляции колец друг от друга и от вала на шпильки надевают трубки из изоляционного материала. Токоподвод от контактных колец к обмотке возбуждения *5* выполняют изолированным проводом через полую часть вала *1*. Снаружи узел контактных колец прикрыт кожухом *6* из тонколистовой стали. Такая конструкция узла является облегченной и обеспечивает хорошее охлаждение колец. Однако по своей прочности, а следовательно, и надежности, она уступает конструкции на втулке.

Для осуществления скользящего контакта с кольцами в синхронных явнополюсных машинах средней и большой мощности обычно применяют либо графитные щетки марки Г-3, либо электрографитированные щетки марки ЭГ-4. Щетки вставлены в щеткодержатели *7*, конструкция которых позволяет регулировать давление щеток и обеспечивает надежное прилегание их к поверхности контактных колец.

Щеткодержатели крепятся на траверсе *8*, состоящей из двух стальных шин, прикрепленных изолированными шпильками *9* к приливам корпуса подшипника.

Часть четвертая

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Глава десятая

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

10.1. УСТРОЙСТВО МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Проектирование машин постоянного тока общего назначения мощностью до 200 кВт ведут на базе серии 2П, а мощностью более 200 кВт — на базе серии П.

В основу серии 2П положено разделение электрических машин по высотам оси вращения (аналогично серии 4А). Серия 2П имеет 11 высот оси вращения: 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280 и 315 мм. Диапазон частот вращения — от 750 до 4000 об/мин. Диапазон мощностей для двигателей — от 0,17 до 200 кВт, для генераторов — от 0,37 до 180 кВт.

На каждой высоте оси вращения предусмотрены машины двух длин станины (M и L) с унифицированными размерами листов якоря. Кроме того, в серии 2П приняты четыре исполнения по степени защиты и способам охлаждения машин:

защищенное исполнение IP22 с самовентиляцией IC01 — обозначается 2ПН;

защищенное исполнение IP22 с независимой вентиляцией IC05 — обозначается 2ПФ;

закрытое исполнение IP44 с естественным охлаждением IC0041 — обозначается 2ПБ;

закрытое исполнение IP44 с обдувом от постороннего вентилятора IC0541 — обозначается 2ПО.

Двигатели серии 2П выполняются с независимым возбуждением при напряжении возбуждения 110 или 220 В независимо от напряжения в цепи якоря (110, 220, 340 или 440 В).

Генераторы серии 2П изготавливаются только в защищенном исполнении IP22 с самовентиляцией IC01. Возбуждение генераторов смешанное, параллельное или независимое. При независимом возбуждении напряжение на обмотке возбуждения 110 или 220 В независимо от напряжения в цепи якоря (115, 230 или 460 В). Генераторы обеспечивают регулирование напряжения от номинального до нуля при независимом возбуждении, до 0,5 $U_{ном}$ — при параллельном возбуждении, до 0,8 $U_{ном}$ — при смешанном возбуждении.

Машины серии 2П защищенного исполнения 2ПН при высоте оси вращения $h = 90 \div 200$ мм изготавливаются с системой изоляции класса нагревостойкости B, а двигатели защищенного исполнения

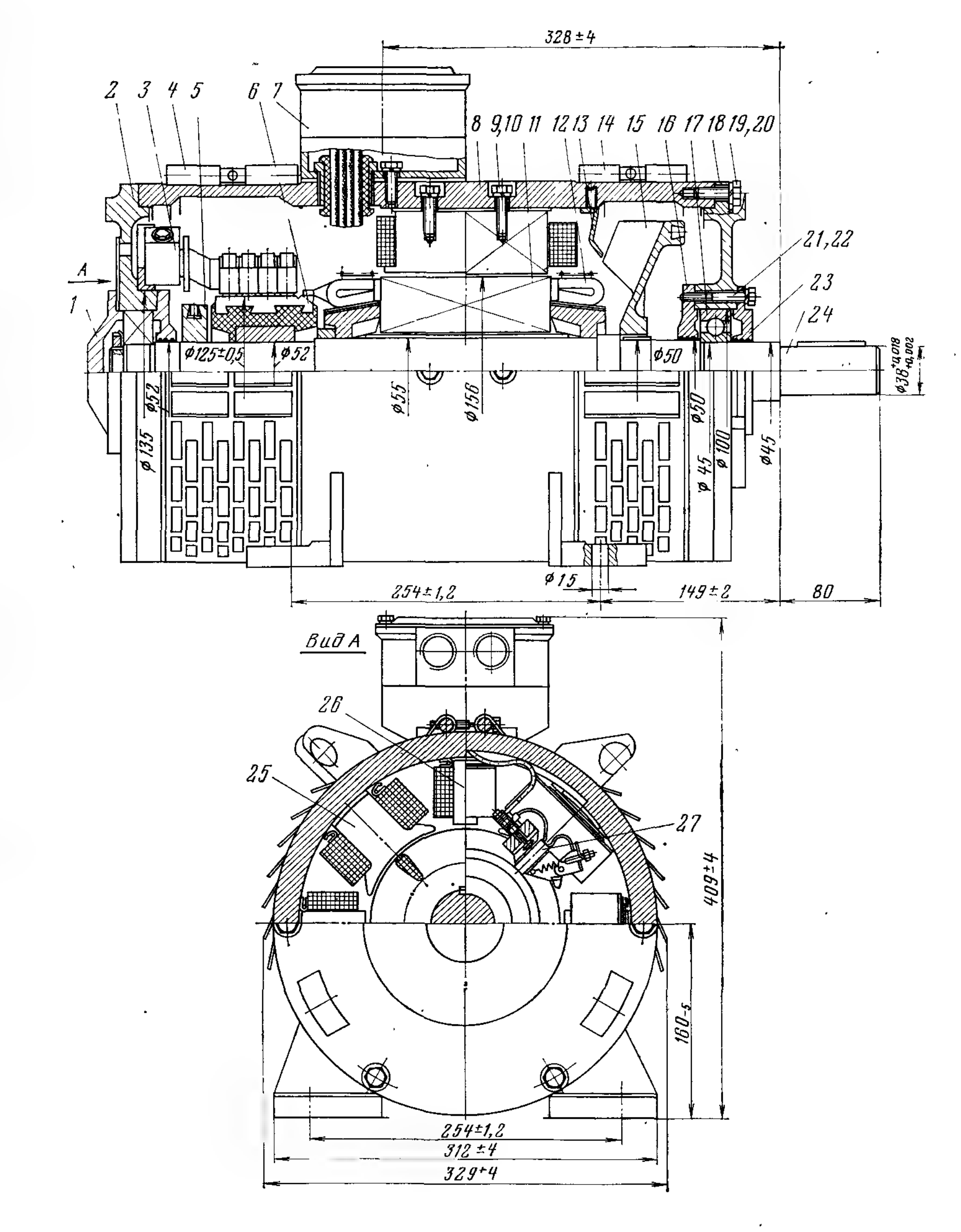


Рис. 10.1. Двигатель постоянного тока типа 2ПН160М исполнения IP22 (7,5 кВт; 220 В; 1500 об/мин):

1 — крышка подшипника наружная; 2 — щит подшипниковый; 3 — траверса; 4 — лента защитная; 5 — балансировочное кольцо; 6 — коллектор; 7 — вводное устройство; 8 — станина; 9 — болт крепления полюса; 10 — шайба; 11 — сердечник якоря; 12 — обмотка якоря; 13 — диффузор; 14 — защитная лента; 15 — вентилятор; 16 — крышка подшипника внутренняя; 17 — шарикоподшипник; 18 — подшипниковый щит; 19 — болт крепления подшипникового щита; 20 — шайба; 21 — болт крепления крышек подшипника; 22 — шайба; 23 — крышка подшипника наружная; 24 — вал; 25 — главный полюс; 26 — добавочный полюс; 27 — щетки

Таблица 10.1

Высота оси вращения h, мм	Номинальные значения мощности, кВт, и КПД, %, при условной длине станины				$n_{ном}$, об/мин
	M		L		
	$P_{ном}$	$\eta_{ном}$	$P_{ном}$	$\eta_{ном}$	
90	0,17	48,5	0,20	54,0	750
90	0,25	56,0	0,34	60,0	1000
90	0,37	64,5	0,55	67,5	1500
90	0,71	70,0	0,90	73,0	2360
90	1,0	72,0	1,3	78,0	3000
100	0,37	59,5	0,42	60,0	750
100	0,50	66,0	0,63	67,0	1000
100	0,75	71,5	1,1	74,0	1500
100	1,2	76,5	1,7	78,0	2200
100	2,0	79,5	2,2	81,0	3000
112	0,6	59,5	0,8	63,0	750
112	0,85	64,5	1,25	68,5	1000
112	1,5	71,5	2,2	75,5	1500
112	2,5	76,5	3,4	79,0	2200
112	3,6	79,0	5,3	81,5	3000
132	1,6	68,5	1,9	71,0	750
132	2,5	73,0	3,0	75,5	1000
132	4,0	79,0	5,5	80,5	1500
132	7,0	83,0	8,5	84,0	2240
132	10,5	84,5	14,0	86,0	3000
160	3,0	76,0	4,0	78,5	750
160	4,5	79,5	6,3	81,5	1000
160	7,5	83,5	11,0	85,5	1500
160	13,0	86,5	16,0	87,0	2200
160	18,0	87,5	24,0	88,0	3150
180	5,6	79,0	7,1	80,0	750
180	8,0	82,5	10,0	82,5	1000
180	15,0	86,0	18,5	87,0	1500
180	26,0	88,5	30,0	89,0	2240
180	37,0	89,0	42,0	90,0	3000
200	8,5	81,5	11,0	83,5	800
200	13,0	84,5	16,0	86,5	1120
200	22,0	87,5	30,0	88,5	1500
200	36,0	89,5	53,0	90,5	2200
200	60,0	90,0	75,0	91,5	3150
225	7,5	77,0	—	—	500
225	11,5	79,5	15,0	79,0	600
225	15,0	80,5	18,5	83,0	750
225	22,0	82,0	26,5	84,5	1000
225	37,0	86,5	45,0	87,5	1500
250	18,5	80,5	22,0	82,0	630
250	22,0	81,0	30,0	84,0	750
250	37,0	85,0	45,0	85,5	1060
250	55,0	87,0	75,0	89,0	1500
280	30,0	84,5	37,0	86,0	600
280	45,0	86,5	55,0	87,5	750
280	75,0	88,5	90,0	88,6	1180
280	110	89,5	132	90,0	1000

Высота оси вращения h, мм	Номинальные значения мощности, кВт, и КПД, % при условной длине станины				$n_{ном}$, об/мин
	M		L		
	$P_{ном}$	$\eta_{ном}$	$P_{ном}$	$\eta_{ном}$	
315	45,0	85,5	55,0	88,0	600
315	55,0	87,0	75,0	88,0	750
315	110	89,0	132	90,0	1000
315	160	90,0	200	91,0	1500

2ПН с $h=225\div315$ мм и закрытого исполнения 2ПБ и 2ПО — класса нагревостойкости F.

Пример условного обозначения двигателя серии 2П: 2ПН112МГУ4 — двигатель защищенного исполнения с самовентиляцией, высота оси вращения 112 мм, первой длины станины, укомплектован тахогенератором, климатическое исполнение У4 по ГОСТ 15150-69.

В серии машин постоянного тока 2П принята увязка высот оси вращения с номинальными мощностями и частотами вращения (табл. 10.1), которой следует руководствоваться при расчете машин постоянного тока общего назначения мощностью до 200 кВт.

На рис. 10.1 показано устройство двигателя постоянного тока типа 2ПН160МУ4, являющегося типичным для серии 2П.

Двигатель имеет защищенное исполнение IP22, способ охлаждения IC01, класс нагревостойкости изоляции B. Станина стальная (сталь марки Ст3), сердечники главных полюсов штампуют из листов холоднокатаной электротехнической стали марок 3411 или 3413 толщиной 1 мм (в некоторых типоразмерах машин толщиной 0,5 мм). Листы штампуют заодно с полюсными наконечниками. Полюсные катушки главных полюсов многослойные из провода круглого сечения марки ПЭТВ.

Сердечник добавочных полюсов набирают из листов холоднокатаной стали толщиной 1 мм. В машинах с высотой оси вращения до 132 мм включительно сердечники добавочных полюсов делают из полосовой стали марки Ст3. Полюсные катушки добавочных полюсов выполняют проводом прямоугольного сечения марки ПСД, за исключением машин малой мощности, в которых для этой цели применяют провод круглого сечения марки ПЭТВ.

Сердечник якоря набирают из листов холоднокатаной электротехнической стали марок 2013, 2211, 2312 или 2411 толщиной 0,5 мм. Листы сердечника якоря собирают на валу, спрессовывают и сжимают двумя шайбами, одна из которых упирается в уступ вала, а другая насажена на вал по горячей посадке. Указанные шайбы выполняют также функции обмоткодержателей для лобовых частей обмотки якоря.

Вал двигателя изготовлен из стали марки 45. Помимо сердечни-

ка якоря и обмоткодержателей на валу расположены коллектор, вентилятор, балансировочное кольцо и подшипники.

В двигателе применена аксиальная система вентиляции: воздух поступает в двигатель через окно в подшипниковом щите со стороны коллектора, проходит через внутреннюю полость машины и выбрасывается наружу через окно в подшипниковом щите со стороны привода. Для обеспечения требуемой степени защиты двигателя вентиляционные окна прикрыты стальными защитными лентами, которые в нижней части имеют отверстия, а в боковых частях—жалюзи. Внутри двигателя имеется щиток (диффузор), направляющий поток воздуха непосредственно на лопатки вентилятора.

К подшипниковому щиту со стороны коллектора прикреплена траверса со щеткодержателями, в которые вставлены щетки. Концы обмоток якоря, возбуждения и добавочных полюсов выведены на панель вводного устройства. В машинах с высотой оси вращения $h \leqslant 200$ мм вводное устройство расположено сбоку или сверху станины, а с $h = 225 \div 315$ мм — на торце щита со стороны коллектора. Лапы для крепления машины в месте ее установки приварены к нижней части станины, а проушины для транспортировки машины приварены к верхней части станины.

В настоящей главе рассматриваются вопросы расчета машин постоянного тока защищенного исполнения (IP22) при способе охлаждения IC01, получившие наибольшее применение.

10.2. ГЛАВНЫЕ РАЗМЕРЫ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Главными размерами машины постоянного тока являются наружный диаметр якоря D_2 и расчетная длина сердечника якоря l_i. Предварительное значение наружного диаметра якоря D_2 принимают по табл. 10.2 в зависимости от высоты оси вращения h.

Далее по (4.14) определяют расчетную длину сердечника якоря l_i. При этом коэффициент формы поля k_B и обмоточный коэффициент $k_{об}$ принимают равными 1, а расчетную мощность, кВт, определяют по формулам:

для генераторов

$$P_i = k_г P_{ном}; \qquad (10.1)$$

для двигателей

$$P_i = k_д P_{ном}. \qquad (10.2)$$

Таблица 10.2

h, мм	$2p$	D_2, мм	h, мм	$2p$	D_2, мм	h, мм	$2p$	D_2, мм
80	2	73	160	4	160	315	4	330
90	2	82	180	4	181	355	4	398
100	2	93	200	4	202	400	4	457
112	2	105	225	4	230	450	4	522
112	4	109	250	4	258	500	4	592
132	4	130	280	4	290			

Значения коэффициентов $k_г$ и $k_д$ принимают в зависимости от номинальной мощности машины:

$P_{ном}$, кВт . . .	До 1	1—10	10—100	100—1000
$k_г$	1,4—1,2	1,2—1,10	1,10—1,06	1,06—1,03
$k_д$	0,65—0,82	0,82—0,85	0,85—0,93	0,93—0,98

Предварительное значение КПД для машин общего назначения мощностью до 200 кВт можно принять по табл. 10.1, а для машин большей мощности — по рис. 10.2.

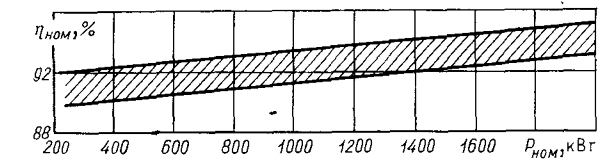


Рис. 10.2. Рекомендуемые значения КПД машин постоянного тока

Предварительное значение коэффициента полюсного перекрытия α_i принимают по рис. 10.3. Важным моментом при проектировании машины постоянного тока является выбор числа главных полюсов $2p$. С увеличением $2p$ уменьшается поперечное сечение станины (ярма), сокращаются длина коллектора и вылет лобовых частей обмотки якоря. Все это способствует получению «короткой» машины. Но одновременно с этим возрастает трудоемкость изготовления машины, увеличивается напряжение между соседними коллекторными пластинами, уменьшается расстояние между сердечниками главных и добавочных полюсов, что способствует росту магнитного потока рассеяния. Практикой проектирования электрических машин постоянного тока выработаны рекомендации при выборе числа главных полюсов $2p$: в машинах с высотой оси вращения $h = 80 \div 100$ мм принимают $2p = 2$, а в машинах с $h = 112 \div$ $\div 500$ мм принимают $2p = 4$.

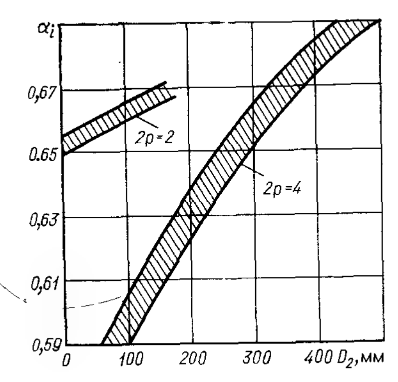


Рис. 10.3. Рекомендуемые значения α_i

Предварительное значение максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре B'_δ для машин защищенного исполнения (IP22) со способом охлаждения IC01 выбирают по рис. 10.4.

Предварительное значение линейной нагрузки A'_2 для машин защищенного исполнения (IP22) со способом охлаждения IC01 принимают по рис. 10.5 в зависимости от наружного диаметра якоря D_2. Значения B'_δ и A'_2, принятые по рис. 10.4 и 10.5, следует привести в соответствие с заданным классом нагревостойкости изоля-

ции, умножив их на поправочные коэффициенты, приведенные в табл. 10.3.

Необходимо иметь в виду, что повышенные значения электромагнитных нагрузок B_δ и A_2 способствуют лучшему использованию объема якоря $(D_2^2 l_i)$, но при этом чрезмерное увеличение A_2 ведет к росту электрических потерь и превышения температуры обмотки якоря, а увеличение B_δ вызывает возрастание МДС обмотки возбуждения, что в конечном итоге ведет к росту габаритов машины

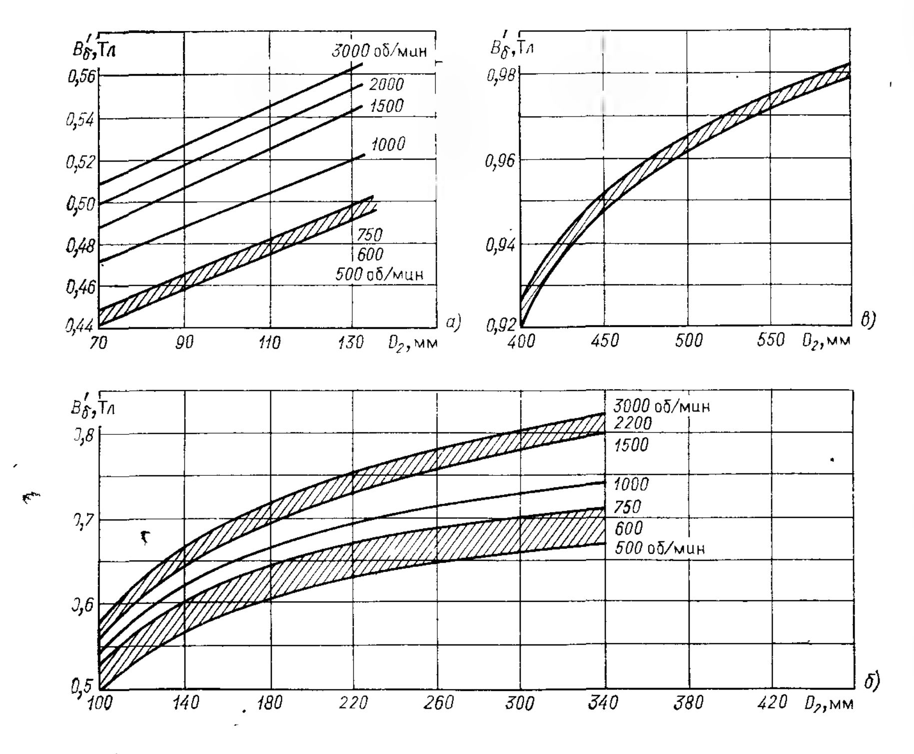


Рис. 10.4. Рекомендуемые значения магнитной индукции B'_δ для машин постоянного тока исполнения по степени защиты IP22:

а — при $2p=2$; *б* и *в* — при $2p=4$

вследствие увеличения объема полюсных катушек главных полюсов. Кроме того, повышенные значения B_δ и A_2 ухудшают коммутацию машины.

При расчете двигателей постоянного тока, предназначенных для работы от тиристорных преобразователей с коэффициентом пульсации напряжения более 1,1, значение B'_δ, принятое по рис. 10.4, следует уменьшить на 10 %, а значение A'_2, принятое по рис. 10.5, уменьшить на 5 %.

Таблица 10.3

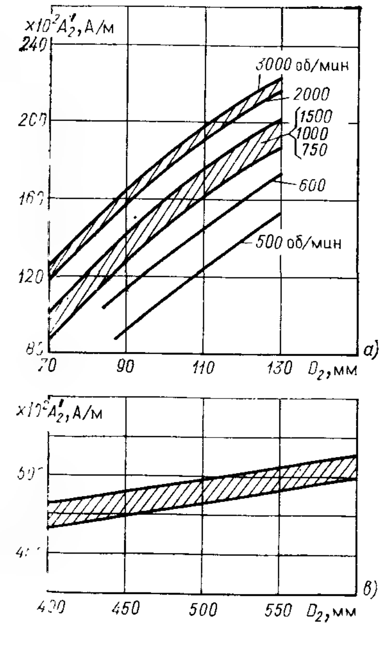
h, мм	Рекомендуемый класс нагревостойкости изоляции	Параметр	Поправочные коэффициенты при классе нагревостойкости изоляции		
			B	F	H
80—200	B	B'_δ	1,0	1,03	1,06
225—500	F		0,97	1,0	1,03
80—200	B	A'_2	1,0	1,1	1,2
225—500	F		0,9	1,0	1,1

Полученное по (4.14) значение расчетной длины сердечника якоря l_i округляют до целого числа, а затем определяют коэффициент длины λ

$$\lambda = l_i/D_2, \quad (10.3)$$

значения которого должны укладываться в диапазон допустимых λ для машин общего назначения (рис. 10.6).

При наружном диаметре якоря $D_2 \leqslant 500$ мм сердечник якоря насаживают непосредственно на вал. В этом случае внутренний



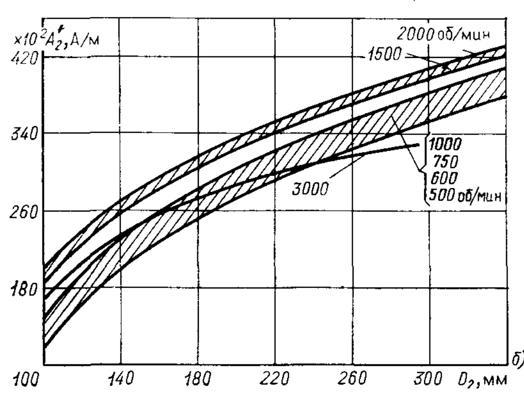


Рис. 10.5. Рекомендуемые значения линейной нагрузки A_2 для машин постоянного тока исполнения по степени защиты IP22:

а — при $2p=2$; *б*, *в* — $2p=4$

диаметр сердечника якоря $D_{2вн}$ предварительно можно принять равным, мм,

$$D_{2вн} = (0{,}30 \div 0{,}36)\, D_2. \qquad (10.4)$$

Уточненное значение $D_{2вн}$ определяют при расчете вала на жесткость (см. § 7.5). Размеры активной части машины постоянного тока показаны на рис. 10.7.

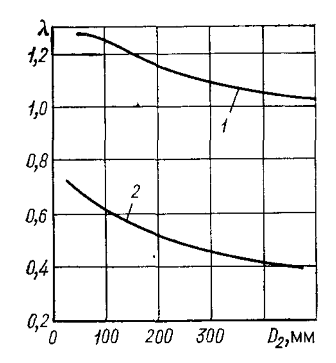


Рис. 10.6. Рекомендуемые значения коэффициента длины для машин постоянного тока:

1 — максимальные значения; 2 — минимальные значения

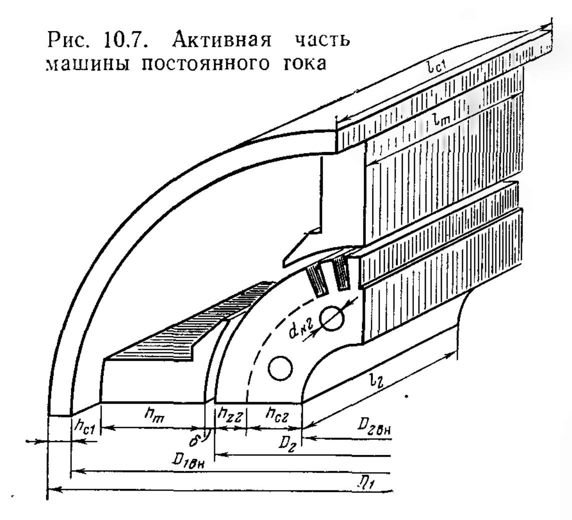


Рис. 10.7. Активная часть машины постоянного тока

10.3. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ

Сердечник якоря шихтуют из отштампованных листов тонколистовой электротехнической холодокатаной стали. Пазы на якоре делают овальными полузакрытыми с параллельными стенками зубцов при всыпной обмотке якоря или прямоугольными открытыми с параллельными стенками пазов (рис. 10.8) при обмотке якоря из жестких секций.

В табл. 10.4 приведены рекомендации по применению различных марок холоднокатаной электротехнической стали, формы пазов и типов обмоток якоря в машинах постоянного тока общего назначения.

Таблица 10.4

h, мм	Напряжение в цепи якоря, В	Марка стали	Форма пазов	Тип обмотки якоря
80—200	⩽600	2013	Полузакрытые овальные	Всыпная
225—315	⩽600	2312	Прямоугольные открытые	Из жестких катушек
355—500	1000	2411	То же	То же

При высоте оси вращения $h \geqslant 225$ мм в сердечнике якоря для улучшения охлаждения и уменьшения массы предусматривают аксиальные вентиляционные каналы в один или два ряда. Рекомендуемые размеры аксиальных вентиляционных каналов: $n_{к,а}$ — число каналов, $d_{к,а}$ — их диаметр, мм, — приведены в табл. 10.5. При двух рядах каналы располагают в шахматном порядке.

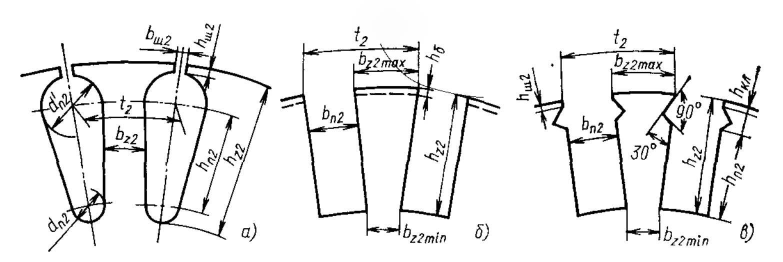


Рис. 10.8. Форма пазов якоря:

а — полузакрытый; б — открытый прямоугольный при креплении обмотки якоря бандажом; в — то же, но при креплении обмотки якоря клиньями

В машинах с высотой оси вращения $h \geqslant 355$ мм для лучшего охлаждения при длине сердечника якоря более 350 мм предусматривают радиальные вентиляционные каналы шириной $b_к = 10$ мм, разделяющие сердечник якоря на пакеты длиной по 55—75 мм. При этом конструктивная длина якоря, мм,

$$l_2 = l_i + n_{к2} b_{к2}, \qquad (10.5)$$

где $n_к$ — число радиальных вентиляционных каналов.

При отсутствии радиальных вентиляционных каналов конструктивная длина якоря равна расчетной длине ($l_2 = l_i$). Для снижения магнитного шума и повышения устойчивости работы двигателей при низких частотах вращения пазы якорей двигателей с высотой оси вращения $h \leqslant 100$ мм при $2p = 2$ скашивают на $1/2$ зубцового деления, а у двигателей с $2p = 4$ всех высот оси вращения скос пазов делают на целое зубцовое деление.

Воздушный зазор δ в значительной степени влияет на свойства машин постоянного тока. С увеличением зазора δ ослабляется размагничивающее действие реакции якоря, улучшается коммутация, уменьшается нагрузка на вал и подшипники, но при этом увеличи-

Таблица 10.5

h, мм	Число рядов	$n_{к,а} \times d_{к,а}$, мм	h, мм	Число рядов	$n_{к,а} \times d_{к,а}$, мм
225	1	12×18	355	2	30×24
250	1	18×18	400	2	30×27
280	2	21×22	450	2	30×30
315	2	25×22	500	2	30×34

вается МДС обмотки возбуждения, что ведет к увеличению габаритов машины и снижению ее КПД. Рекомендуемые значения воздушного зазора для машин постоянного тока приведены на рис. 10.9. В целях снижения размагничивающего действия реакции якоря и улучшения коммутации зазор под главными полюсами в некоторых конструкциях машин постоянного тока делают эксцентричным (рис. 10.10): по оси полюса $\delta_{min}=0{,}66\delta$, а по краям полюсного наконечника $\delta_{max}=2\delta$, где δ — среднее значение зазора, принятого по рис. 10.9.

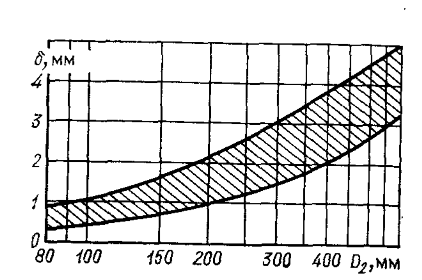


Рис. 10.9. Рекомендуемые значения воздушного зазора для машин постоянного тока

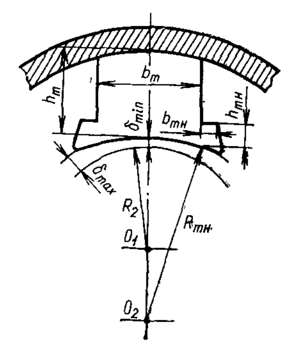


Рис. 10.10. Сердечник главного полюса

Длина сердечника главного полюса l_m обычно равна конструктивной длине якоря, т. е. $l_m=l_2$. Что же касается высоты главного полюса h_m, то она должна быть достаточной для размещения на сердечнике полюсной катушки возбуждения. Поэтому предварительное значение h_m определяют по рис. 10.11, а после расчета обмотки возбуждения размер h_m уточняют.

Ширину главного полюса b_m, мм, определяют, исходя из допустимого значения магнитной индукции в сердечнике полюса B_m:

$$b_m = B'_\delta \alpha'_i \tau\sigma'/k_{cm} B_m, \tag{10.6}$$

где k_{cm} — коэффициент заполнения сердечника полюса сталью ($k_{cm}=0{,}98$); τ—полюсное деление, мм:

$$\tau = \pi D_2/2p; \tag{10.7}$$

σ' — предварительное значение коэффициента магнитного рассеяния главных полюсов машины: для машин с $2p=2$ принимают $\sigma'=1{,}15$, а для машин с $2p=4$ $\sigma'=1{,}2$.

Для машин постоянного тока защищенного исполнения (IP22) и способом охлаждения IC01 принимают $B_m=1{,}6\div1{,}7$ Тл.

Сердечники главных полюсов собирают из отштампованных листов холоднокатаной анизотропной стали марки 3411 толщиной 1 мм. Листы не изолируют. При штамповке листов из анизотропной холоднокатаной стали необходимо учитывать обязательное

совпадение направления проката с направлением магнитного потока в полюсе, т. е. с направлением оси полюса.

На полюсных наконечниках главных полюсов имеются выступы (см. рис. 10.10), предназначенные для крепления полюсной катушки. Ширину этого выступа принимают равной $b_{mн}=0{,}10\div\div0{,}14)b_m$. Высота полюсного наконечника в основании выступа $h_{mн}$ должна быть такой, чтобы магнитная индукция $B_{mн}$ в этом сечении не превышала 0,85 B_m. Предварительно высоту $h_{mн}$ определяют по формуле, мм,

$$h_{mн} = \frac{B'_\delta}{1{,}67B_m}(b_p - b_m), \tag{10.8}$$

где b_p — расчетная длина дуги полюсного наконечника:

$$b_p = \alpha'_i \tau. \tag{10.9}$$

Сердечники добавочных полюсов машин с $h\leqslant132$ мм выполняют из полосовой стали марки Ст3. В машинах с $h\geqslant160$ мм сердечники добавочных полюсов шихтуют из листов холоднокатаной анизотропной стали марки 3411 толщиной 1 мм. При этом форма листов имеет небольшое расширение на стороне, обращенной к якорю (рис. 10.12, *а*). В машинах с $h=355\div500$ мм листы добавочных полюсов имеют Т-образную форму с расширением на стороне, обращенной к станине (рис. 10.12, *б*), что позволяет снизить магнитную индукцию в зоне наибольшего магнитного насыщения полюса.

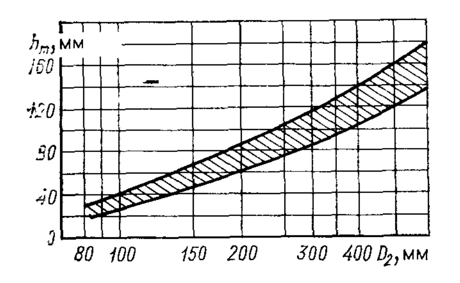


Рис. 10.11. Рекомендуемые значения высоты главного полюса

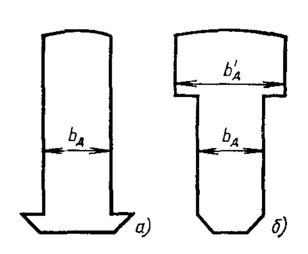


Рис. 10.12. Форма листов добавочного полюса

Длину наконечника сердечника добавочного полюса $l_д$ в машинах с $h\leqslant132$ мм, у которых добавочные полюсы выполнены из полосовой стали, принимают равной конструктивной длине сердечника якоря. При этом длину сердечника этого полюса делают короче полюсного наконечника на 5—8 мм с каждой стороны. Образующиеся в этом случае по длине полюса уступы служат для крепления полюсной катушки. В машинах с $h\geqslant160$ мм длину сердечника добавочного полюса принимают равной конструктивной длине сердечника якоря, т. е. $l_д=l_2$.

Предварительное значение ширины сердечника добавочного полюса $b_д$ принимают по рис. 10.13, а значение воздушного зазора между наконечником добавочного полюса и якорем $\delta_д$ — по рис. 10.14. В сердечниках Т-образной формы (см. рис. 10.12, *б*) обычно принимают $b'_д = (1{,}6 \div 2{,}2)\, b_д$.

В машинах с $2p=2$ рекомендуется применение одного добавочного полюса, а в четырехполюсных — полное число добавочных полюсов ($2p_д=4$).

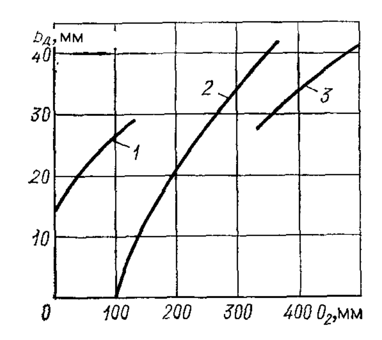


Рис. 10.13. Рекомендуемые значения ширины сердечника добавочного полюса:

1 — при $h \leqslant 100$ мм, $2p=2$; 2 — при $h=132 \div 315$ мм, $2p=4$; 3 — при $h=355 \div 500$ мм, $2p=4$

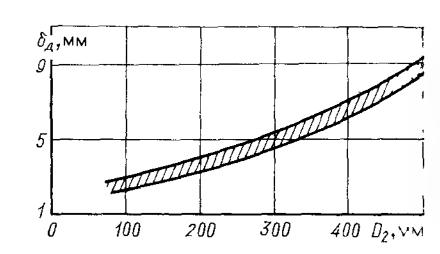


Рис. 10.14. Рекомендуемые значения воздушного зазора под добавочным полюсом

Высота спинки станины h_{c1}, мм, определяется допустимым значением магнитной индукции в станине $B_{c1} = 1{,}2 \div 1{,}3$ Тл:

$$h_{c1} = B'_\delta \alpha'_i \tau \sigma' l / 2 B_{c1}\, l_{c1}. \qquad (10.10)$$

Длина станины l_{c1} должна быть такой, чтобы закрыть лобовые части главных полюсов. Ориентировочно можно принять

$$l_{c1} \approx l_2 + k_l \tau, \qquad (10.10а)$$

где k_l — коэффициент, равный 0,5 при $2p=2$ и 0,65 при $2p=4$.

Внутренний диаметр станины, мм,

$$D_{1вн} = D_2 + 2\delta_{min} + 2h_m + 2\delta. \qquad (10.11)$$

Здесь 2δ учитывает наличие стальных прокладок между главным полюсом и станиной, предназначенных для регулировки воздушного зазора δ_{min}.

Наружный диаметр станины, мм,

$$D_{1н} = D_{1вн} + 2h_{c1}. \qquad (10.11а)$$

Наружный диаметр станины должен быть меньше двойного значения высоты оси вращения на 5—12 мм.

10.4. ОБМОТКА ЯКОРЯ

В машинах постоянного тока обычно применяют обмотки якоря следующих типов: петлевые (простые и сложные), простую волновую и комбинированную. Каждая из обмоток якоря характеризуется следующими параметрами: числом параллельных ветвей $2a_2$; первым y_1, вторым y_2 и результирующим y частичными шагами обмотки и шагом по коллектору $y_к$.

Любой тип обмотки якоря должен удовлетворять условиям симметрии: Z_2/a_2 — целое число; K/a_2 — целое число; $2p/a$ — целое число; K/Z_2 — целое число, где Z_2 — число пазов якоря; a_2— число пар параллельных ветвей обмотки якоря; K —число коллекторных пластин.

Применение того или иного типа обмотки якоря диктуется технико-экономическими требованиями к электрической машине. Выбранный тип обмотки должен обеспечить получение в машине требуемой ЭДС при токе в параллельной ветви, не превышающем допустимого значения. При этом следует стремиться к минимальному числу уравнительных соединений и минимальному числу параллельных ветвей. Последнее вызвано тем, что число проводников в обмотке якоря пропорционально числу параллельных ветвей и если на каждый паз якоря приходится большое число проводников, то объем изоляции в пазу увеличивается. В итоге площадь паза будет использована неудовлетворительно, так как значительная часть ее будет занята изоляцией.

Для выполнения обмотки якоря определяют шаг обмотки по реальным пазам

$$y_z = y_1/u_п, \qquad (10.12)$$

где $u_п$ — число пазовых сторон в одном слое паза:

$$u_п = Z_э/Z_2. \qquad (10.13)$$

В этих выражениях y_1 — первый шаг обмотки по якорю:

$$y_1 = (Z_э/2p) \mp \varepsilon; \qquad (10.14)$$

$Z_э$ — число элементарных пазов обмотки якоря, определяется числом пар пазовых сторон секций обмотки, равным числу коллекторных пластин ($Z_э=K$); ε — правильная дробь, которую следует вычесть из первого слагаемого выражения (10.14) или же прибавить к нему, чтобы y_1 стало целым числом.

Шаг обмотки по коллектору для простой волновой обмотки

$$y_1 = (K \mp 1)/p. \qquad (10.14а)$$

Если $u_п$ — целое число, то обмотка якоря является равносекционной, т. е. все секции (катушки) этой обмотки имеют одинаковую ширину (рис. 10.15, *а*). Если же $y_z/u_п$ — дробное число, то обмотку якоря выполняют ступенчатой, с секциями (катушками) разной ширины. При этом если несколько секций такой обмотки одними пазовыми сторонами лежат в одном реальном пазу, то другие пазовые стороны этих секций лежат в разных пазах (рис. 10.15, *б*).

Ступенчатые обмотки в изготовлении сложнее равносекционных, но они обеспечивают лучшую коммутацию, особенно в машинах с тяжелыми условиями работы.

Прежде чем выбрать тип обмотки, следует определить номинальный ток якоря:

для генераторов

$$I_{2ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{U_{ном}} (1 + k_i); \qquad (10.15)$$

для двигателей

$$I_{2ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{\eta'_{ном} U_{ном}} (1 - k_i). \qquad (10.16)$$

Здесь k_i — коэффициент, учитывающий ток в параллельной обмотке возбуждения, он может принимать следующие значения:

$P_{ном}$, кВт . .	До 1	1—5	5—10	10—100	100—500
k_i	0,2—0,1	0,1—0,07	0,07—0,025	0,025—0,02	0,02—0,0125

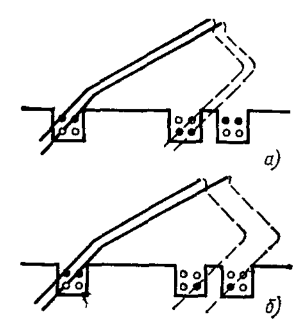


Рис. 10.15. Секции обмоток якоря:

а — равносекционной; *б* — ступенчатой

Затем, определив требуемое число главных полюсов $2p$ (см. табл. 10.2), принимают решение о типе обмотки якоря. Для этого можно воспользоваться рекомендациями табл. 10.6, составленной по данным машин постоянного тока единых серий.

При выборе петлевой или комбинированной обмоток в быстроходных машинах ($v \geqslant 40$ м/с) и в машинах, работающих со значительными перегрузками, предпочтение отдают комбинированной обмотке; в тихоходных машинах и в машинах, работающих с небольшими перегрузками, целесообразнее применение петлевой обмотки.

При расчете параметров выбранного типа обмотки якоря следует иметь в виду данные, приводимые в табл. 10.7.

Число эффективных проводников обмотки якоря

$$N_2 = A'_2 \pi D_2 2a_2 / I_{2ном} \cdot 10^3. \qquad (10.17)$$

Таблица 10.6

2 p	$I_{2ном}$, А	Тип обмотки якоря
2	—	Простая петлевая
4	До 700	Простая волновая
4	Свыше 700 до 1400	Простая петлевая или комбинированная
4	Свыше 1400	Двухходовая петлевая или комбинированная

Число пазов якоря

$$Z_2 = \pi D_2 / t_2, \qquad (10.18)$$

где t_2 — зубцовое деление якоря, мм, принимают в зависимости от высоты оси вращения:

h, мм	80—200	225—315	355—500
t_2, мм	10—20	15—35	18—40

Окончательно число пазов якоря Z_2 принимают в соответствии с рекомендациями табл. 10.7 согласно выбранному типу обмотки.

При выборе значений N_2 и Z_2 необходимо иметь в виду, что число эффективных проводников в пазу N_2/Z_2 должно быть четным.

Затем определяют диаметр коллектора, мм:

при полузакрытых пазах якоря

$$D_к \approx (0{,}75 \div 0{,}80) D_2; \qquad (10.19)$$

при открытых пазах якоря и наличии петушков на коллекторных пластинах

$$D_к \approx (0{,}65 \div 0{,}70) D_2. \qquad (10.20)$$

Полученное значение $D_к$ следует округлить до ближайшего стандартного значения: 56; 63; 71; 80; 90; 100; 112; 125; 140; 160; 180; 200; 224; 250; 280; 315; 400; 450; 500; 560 мм. При этом максимальная окружная скорость коллектора, м/с,

$$v_к = \pi D_к n / 60 \cdot 10^3 \qquad (10.21)$$

не должна превышать 40 м/с. Здесь n — наибольшая частота вращения якоря машины, об/мин.

Коллекторное деление, мм,

$$t_к = \pi D_к / K. \qquad (10.22)$$

Принятое значение $t_к$ должно быть не меньше следующих значений:

h, мм	56—125	140—280	315—500
$t_{к\,min}$, мм	3,0	3,5	3,8

Если же при расчете получено $t_к < t_{к min}$, то следует уменьшить число коллекторных пластин K, однако при этом напряжение между соседними коллекторными пластинами, В,

$$U_к = 2p U_{ном} / K \qquad (10.23)$$

не должно превышать для машин мощностью до 1 кВт 25—30 В, более 1 кВт без компенсационной обмотки — 16 В; для машин с компенсационной обмоткой — 20 В. Превышение допустимого значения $U_к$ создает опасность возникновения на коллекторе искрения.

17*

Тип обмотки якоря	$2p$	$2a_2$	Z_2	Z_2/p	$K=Z_э$
Простая петлевая	2	2	Четное	Четное	Четное
Двухходовая петлевая ступенчатая	4	8	Четное	Четное	Четное
Простая волновая	4	2	Нечетное	Целое +0,5	Нечетное
Комбинированная	4	8	Четное	Нечетное	Четное

Толщина прокладок между пластинами коллектора должна быть 0,8 мм у машин с высотой оси вращения $h=80\div315$ мм и 1,0 мм при $h=355\div500$ мм.

Окончательный выбор числа секционных сторон по ширине паза $u_п$ числа коллекторных пластин K, числа витков секции w_{c2} ведут по результатам сравнения нескольких вариантов после заполнения таблицы, составленной аналогично табл. 10.8.

Затем уточняют линейную нагрузку машины, А/м,

$$A_2=\frac{N_2 I_{2ном}}{2a_2\pi D_2\cdot 10^{-3}}, \tag{10.24}$$

где

$$N_2=2u_п Z_2 w_{c2}.$$

Дальнейший расчет обмотки якоря связан с определением размеров паза и зависит от принятой его формы (см. табл. 10.4).

Пазы якоря овальные полузакрытые (см. рис. 10.8, *а*). Ширина зубца с равновеликим сечением, мм,

$$b_{z2}=B'_\delta t'_2/k_{c2}B'_{z2}. \tag{10.25}$$

Предварительное значение магнитной индукции в зубце B'_{z2} принимают в зависимости от частоты перемагничивания

$$f_2=pn/60. \tag{10.26}$$

f_2, Гц	100	75	50	≤25
B'_{z2}, Тл	1,65—1,85	1,75—1,95	1,85—2,05	1,9—2,1

Таблица 10.7

$u_п=\frac{Z_э}{Z_2}$	y_Z	$y=y_K$	Наличие уравнительных соединений: первого рода	второго рода
2; 3; 4; 5	$(Z_2/2)-1$	±1	Нет	Нет
2; 3; 4	Ступенчатый	±2	Есть	Есть
3; 5	$(Z_2/4)\mp\xi$	$\frac{K\mp1}{2}$	Нет	Нет
3; 5	$y_{Z\,петл}\ (z_2/4)\mp\xi$	±1	Нет	Нет
	$y_{Z\,волн}=(z_2/2)-y_z$	$\frac{K\mp4}{2}$		

Диаметр большой окружности паза, мм,

$$d'_{п2}=\frac{\pi(D_2-2h_{ш2})-Z_2 b_{z2}}{Z_2+\pi}, \tag{10.27}$$

где $h_{ш2}$ — высота шлицы паза, равная 0,8 мм.

Высоту зубца h_{z2} принимают предварительно по рис. 10.16 и определяют магнитную индукцию в спинке якоря B_{c2}, Тл:

$$B_{c2}=\frac{B_\delta \alpha'_i \tau}{2k_{c2}\left(h_{c2}-\frac{2}{3}d_{к2}\right)}, \tag{10.28}$$

где h_{c2} — высота спинки якоря мм:

$$h_{c2}=\frac{D_2-D_{2вн}}{2}-h_{z2}. \tag{10.29}$$

Выражение $\frac{2}{3}d_к$ учитывает наличие в сердечнике якоря аксиальных вентиляционных каналов диаметром $d_к$.

Полученное по (10.28) B_{c2} не должно превышать следующих значений:

f_2, Гц	50—100	≤50
B_{c2} при $2p=2$, Тл	1,6	1,7
B_{c2} при $2p=4$, Тл	1,4	1,45

Если полученное значение превышает рекомендуемое, то следует несколько увеличить высоту спинки якоря h_{c2} путем уменьшения высоты зубца h_{z2}.

Таблица 10.8

Номер варианта	$u_п$	$K=u_п Z_2$	$D_к$	$t_к$	$w_{c2}=N_2/2K$	$U_к$

Диаметр меньшей окружности паза, мм,

$$d_{п2}=\frac{\pi (D_2-2h_{z2})-Z_2 b_{z2}}{Z_2-\pi}. \quad (10.30)$$

Расстояние между центрами окружностей, мм,

$$h_{п2}=h_{z2}-h_{ш2}-0{,}5\,(d'_{п2}+d_{п2}). \quad (10.31)$$

Площадь паза в свету, мм²,

$$S_{п2}=(\pi/8)\left[(d'_{п2}-b_{пр})^2+(d_{п2}-b_{пр})^2\right]+0{,}5(d'_{п2}+d_{п2}-2b_{пр})\,h_{п2}, \quad (10.32)$$

где $b_{пр}$ — припуск на сборку сердечника якоря по ширине паза, мм:

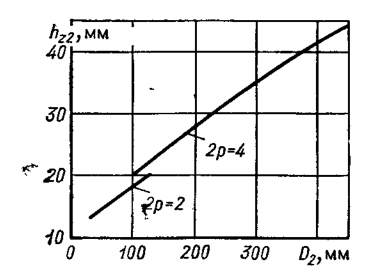


Рис. 10.16. Средние значения $h_{z2}=f(D_2)$

h, мм	80—132	160—200
Припуск по ширине паза $b_{пр}$, мм .	0,1	0,2
Припуск по высоте паза $h_{пр}$, мм . .	—	—

Продолжение

h, мм	225—315	355—500
Припуск по ширине паза $b_{пр}$, мм .	0,3	0,35
Припуск по высоте паза $h_{пр}$, мм . .	0,3	0,3

Площадь паза, занимаемая обмоткой, мм²,

$$S_{об}=S_{п2}-S_и-(S_{кл}+S_{пр}), \quad (10.33)$$

где $S_и$ — площадь, занимаемая корпусной изоляцией, мм²:

$$S_и\approx 0{,}5b_и\,(\pi d'_{п2}+\pi d_{п2}+4h_{п2}). \quad (10.34)$$

Для определения толщины изоляции $b_и$ обмотки якоря при овальных полузакрытых пазах сердечника якоря следует воспользоваться данными табл. 10.9.

При креплении обмотки в пазу клином, мм²,

$$S_{кл}+S_{пр}\approx 2{,}5d_{п2};$$

при креплении обмотки в пазу крышкой, мм²,

$$S_{кл}+S_{пр}\approx 1{,}5d_{п2},$$

где $S_{кл}$ — площадь поперечного сечения клина или пазовой крыш-

ки, мм²; $S_{пр}$ — площадь поперечного сечения прокладки между верхним и нижним слоями пазовых частей обмотки якоря, мм².

Предварительное значение диаметра изолированного обмоточного провода круглого сечения $d'_{из}$, мм, определяют исходя из допустимого значения коэффициента заполнения паза изолированными проводами $k_{з2}=0{,}70\div 0{,}75$:

$$d'_{из}=\sqrt{k_{з2} S_{об} Z_2/N_2}, \quad (10.35)$$

где N_2 — количество эффективных проводников в обмотке якоря (10.17).

При классе нагревостойкости изоляции B для обмоток якоря применяют провода круглого сечения марки ПЭТВ, а при классе F — марки ПЭТ-155 (см. приложение П1, табл. П.1.1). Уточненное значение коэффициента заполнения паза якоря при стандартном диаметре изолированного провода

$$k_{з2}=N_2 d^2_{из}/S_{об} Z_2. \quad (10.36)$$

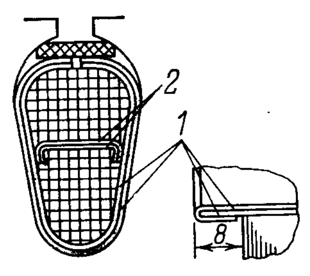


Таблица 10.9. **Изоляция обмотки якоря машин постоянного тока (пазы овальные полузакрытые; обмотка двухслойная всыпная из круглого эмалированиого провода; напряжение до 600 В)**

Позиция на рисунке	Высота оси враще-иия, мм	Материал				Число слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм
		Класс иагревостойкости			Толщина, мм		
		B	F	H			
		Плеикостеклопласт					
1	80—112	Изофлекс	Имидофлекс		0,35	1	0,35
2	80—112	То же	То же		0,35	1	0,35
		Пленкостеклопласт					
1	132—200	Изофлекс	Имидофлекс		0,25	2	0,50
2	132—200	То же	То же		0,25	2	0,50

Примечание. Прокладку между катушками в лобовых частях обмотки выполияют из изофлекса.

Если $d_{из} > 1,71$ мм, то для упрощения укладки всыпной обмотки якоря и повышения ее надежности эффективный проводник разделяют на элементарные, а затем уточняют коэффициент заполнения паза якоря

$$k_{з2} = n_{эл} N_2 d_{из}^2 / S_{об} Z_2, \tag{10.37}$$

где $n_{эл}$ — количество элементарных проводников в одном эффективном; $d_{из}$ — диаметр изолированного элементарного проводника, мм.

После этого определяют плотность тока в обмотке якоря, А/мм²,

$$\Delta_2 = I_{2ном}/2a_2 n_{эл} q_{2эл}, \tag{10.38}$$

где $q_{2эл}$ — площадь поперечного сечения элементарного проводника, мм². Полученное значение Δ_2 следует сравнить с допустимым $\Delta_{доп}$, которое определяют по произведению $A_2\Delta_{доп}$ (рис. 10.17, *а*, *б*)

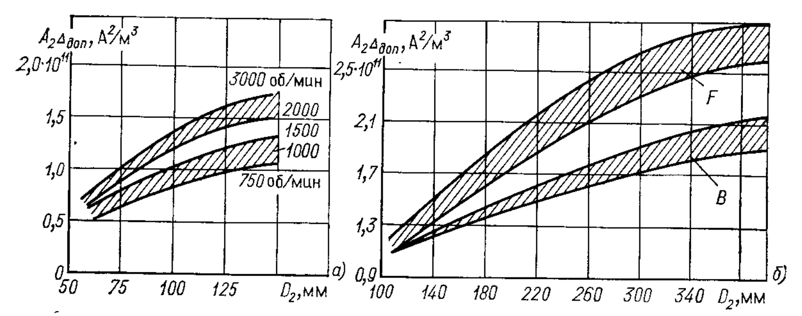


Рис. 10.17. Рекомендуемые значения $A_2\Delta_{доп}$ для машин постоянного тока: *а* — $2p=2$; *б* — $2p>4$

с учетом поправочного коэффициента на класс нагревостойкости изоляции (табл. 10.10). Верхние границы значений $A_2\Delta_{доп}$ на рис. 10.17, *б* соответствуют частоте вращения 3000 об/мин, а нижние— 500 об/мин. Допустимая плотность тока может быть определена по формуле

$$\Delta_{доп} = (A_2 \Delta_{доп}) \cdot 10^{-6}/A_2. \tag{10.39}$$

Если же $\Delta_2 > \Delta_{доп}$, то необходимо увеличить площадь паза и размеры обмоточного провода. При этом следует уточнить значения магнитной индукции в зубце и спинке якоря, которые не должны превышать допустимых значений.

Таблица 10.10

h, мм	Рекомендуемый класс нагревостойкости изоляции	Поправочные коэффициенты при классе нагревостойкости изоляции		
		B	F	H
80—200	B	1,0	1,1	1,2
225—500	F	0,9	1,0	1,1

Размеры секции обмотки якоря:

средняя ширина секции, мм,

$$b_{с,ср} = t_{ср2}\, y_z, \tag{10.40}$$

где $t_{ср2}$ — среднее зубцовое деление якоря, мм:

$$t_{ср2} = \pi (D_2 - h_{z2})/Z_2; \tag{10.41}$$

средняя длина одной лобовой части секции обмотки, мм,

$$l_{л2} = (0,7 + 0,4p)\, b_{с,ср} + 15; \tag{10.42}$$

средняя длина витка обмотки, мм,

$$l_{ср2} = 2(l_2 + l_{л2}); \tag{10.43}$$

вылет лобовой части обмотки

$$l_{в2} = (0,12 \div 0,14p)\, b_{с,ср} + 7,5. \tag{10.44}$$

Активное сопротивление обмотки якоря, Ом,

$$r_2 = \frac{\rho_{Cu} N_2 l_{ср2} \cdot 10^3}{2(2a)^2 n_{эл} q_{2эл}}, \tag{10.45}$$

где ρ_{Cu} — удельное электрическое сопротивление меди при расчетной рабочей температуре (см. табл. 2.1).

Пазы якоря прямоугольные открытые (см. рис. 10.8, ***б*** **и** ***в*****).** Предварительное значение ширины зубца в его основании, мм,

$$b_{z2min} = t_2 B'_\delta / k_{c2} B'_{z2max}. \tag{10.46}$$

Предварительное значение магнитной индукции в наиболее узком сечении зубца B'_{z2max} принимают в зависимости от частоты перемагничивания сердечника якоря f_2:

f_2, Гц	100	75	50	⩽25
B'_{z2max}, Тл	1,9—2,1	2,0—2,2	2,1—2,3	2,2—2,4

Высоту зубца (паза) h_{z2} предварительно принимают по рис. 10.16, а затем определяют магнитную индукцию в спинке якоря по (10.28), которая не должна превышать допускаемых значений. При необходимости следует уменьшить высоту зубца h_{z2}.

Ширина паза, мм,

$$b_{п2} = \frac{\pi (D_2 - 2h_{z2})}{Z_2} - b_{z2min}. \tag{10.47}$$

В машинах с высотой оси вращения $h = 225 \div 315$ мм целесообразно крепление пазовой части обмотки якоря бандажом из стеклоленты. Высоту бандажных канавок $h_б$ (см. рис. 10.8, *б*) принимают в зависимости от высоты оси вращения:

h, мм	225	250 и 280	315
$h_б$, мм	2,0	3,0	3,5

В машинах с высотой оси вращения $h=355\div500$ мм пазовую часть обмотки якоря крепят клиньями, при этом высоту клина принимают $h_{кл}=4$ мм, а высоту шлица $h_{ш2}=1,0$ мм (см. рис. 10.8, *в*).

Высота прямоугольного провода, мм,

$$b'_{из}=(h_{z2}-C_{h2}-h_{б}-h_{пр})/N_h. \qquad (10.48)$$

В случае крепления обмотки клиньями вместо $h_б$ следует подставить $h_{кл}+h_{ш2}$.

Ширина прямоугольного провода с изоляцией, мм,

$$a'_{из}=(b_{п2}-C_{b2}-b_{пр}-b_{ск})/u_{п}. \qquad (10.49)$$

В этих выражениях C_{h2} и C_{b2} — общая толщина изоляции в пазу якоря по его высоте и ширине без учета витковой изоляции (табл. 10.11 и 10.12). Припуск по ширине паза, обусловленный скосом пазов, $b_{ск}=0,1$ мм.

Число проводов по высоте паза якоря определяется выражением

$$N_h=2w_{c2}. \qquad (10.50)$$

В целях уменьшения эффекта вытеснения тока и ослабления вихревых токов в проводах обмотки якоря высоту провода ограничивают до значения, определяемого частотой перемагничивания сердечника якоря f_2:

f_2, Гц	100	50	⩽25
Предельная высота провода, мм	4	7	10

При необходимости эффективный проводник разделяют по высоте на два элементарных. В этом случае $N_h=4\,w_{c2}$.

В случае комбинированной (лягушачьей) обмотки высота элементарного проводника является высотой эффективного проводника каждой обмотки, составляющей комбинированную. Для обмоток якорей машин с высотой оси вращения $h=225\div315$ мм применяют провода прямоугольного сечения следующих марок: при классе нагревостойкости В — провод марки ПЭТВП, а при классе F — провод марки ПЭТП-155.

Для обмоток якорей машин с $h=355\div500$ мм при классах нагревостойкости изоляции В и F применяют провод марки ПСД с дополнительной изоляцией стеклолентой; при классе нагревостойкости изоляции Н применяют провод марки ПСДК с дополнительной изоляцией полиимидной пленкой. Значения двусторонней толщины изоляции, мм, этих проводов приведены ниже.

Марка провода	Меньшая сторона сечения проволоки, мм		
	0,85—1,90	2,12—3,75	4,0—5,6
ПСД, ПСДК	0,27	0,33	0,40
ПЭТВП, ПЭТП-155	0,10—0,12	0,15	—

Таблица 10.11. **Изоляция обмотки якоря машин постоянного тока (пазы открытые, обмотка из прямоугольного провода, $h=225\div315$ мм, напряжение до 600 В)**

Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал: класс нагревостойкости B	Материал: класс нагревостойкости F	Материал: класс нагревостойкости H	Толщина, мм: класс B	Толщина, мм: классы F, H	Число слоев: класс B	Число слоев: классы F, H	Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине	по высоте при w_{c2}: 1	2	3	4
Пазовая	1	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Ситофолий F	Синтофолий Н	0,15	0,16	4,5 оборота	3,5 оборота	1,1	2,2	2,2	2,2	2,2
	2	То же	То же	То же	0,15	0,16	0—6		—	—	0,3	0,6	0,9
	3	Стеклолакоткань ЛСП			0,15		1	1	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6
		Стеклотекстолит											
	4	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1	—	0,5	0,5	0,5	0,5
	5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1	—	0,5	0,5	0,5	0,5
	6	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1	—	0,5	0,5	0,5	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки							0,3	0,5	0,5	0,5	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой высоты клина или без высоты бандажной канавки)							1,7	4,8	5,1	5,4	5,7
Лобовая	7	Стеклослюдинитовая лента ЛС-ПЭ-934-ТП		Пленка полиимидная марки ПМ 0,05×3	0,15		1 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	8	Стеклянная лента ЛЭС			0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	—	Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)							1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 10.12. **Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока [пазы прямоугольные открытые: обмотка двухслойная петлевая, волновая, комбинированная разрезная с жесткими формированными катушками из провода марки ПСД (класс F) и ПСДК (класс H); $h=355\div500$ мм, напряжение до 1000 В]**

Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал: класс нагревостойкости F	Материал: класс нагревостойкости H	Толщина, мм: класс F	Толщина, мм: класс H	Число слоев: класс F	Число слоев: класс H	Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине при $u_п$ = 2	3	4	5	по высоте
Пазовая	1	Стеклянная лента ЛЭС	Полиимидная пленка ПМ	0,1	0,05	1 впритык	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,8
	2	Бумага фенилоновая		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
	3	Полиимидная пленка ПМ		0,05		3 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	1,2
	4	Бумага фенилоновая		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	5	Стеклянная лента ЛЭС		0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,8
	6	Бумага фенилоновая		0,2		1		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	7	Стеклотекстолит СТЭФ	СТК	0,5		1		—	—	—	—	0,5
	8	СТЭФ	СТК	0,5		1		—	—	—	—	0,5
	9	СТЭФ	СТК	0,5		1		—	—	—	—	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки						0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина)						2,1	2,1	2,3	2,3	5,8
Лобовая	10	Стеклянная лента ЛЭС	Полиимидная пленка ПМ	0,1	0,05	1 впритык	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
	11	Бумага фенилоновая		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	12	Полиимидная пленка ПМ		0,05		2 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	13	Бумага фенилоновая		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	14	Стеклянная лента ЛЭС		0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	—	Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)						1,2	1,2	1,4	1,4	1,5

Определив высоту неизолированного провода, мм,

$$b' = b'_{из} - \delta_{из} \quad (10.51)$$

и его ширину, мм,

$$a' = a'_{из} - \delta_{из}, \quad (10.52)$$

округляют полученные значения до ближайших стандартных b и a по табл. П.1.2 и определяют уточненные значения размеров изолированного провода по высоте $b_{из}$ и ширине $a_{из}$, а также площадь поперечного сечения меди q. Затем уточняют размеры паза по высоте, мм,

$$h_{z2} = N_h b_{из} + C_h + h_б + h_{пр} \quad (10.53)$$

и ширине, мм,

$$b_{п2} = u_п a_{из} + C_в + b_{пр} + b_{ск}. \quad (10.54)$$

Полученные размеры паза округляют до десятых долей миллиметра. Затем по (10.38) определяют плотность тока в обмотке якоря, которая не должна превышать допустимое значение $\Delta_{доп}$ (10.39). Если же $\Delta_2 > \Delta_{доп}$, то выбирают провод большего сечения, увеличив соответственно площадь паза якоря. При этом необходимо следить за тем, чтобы магнитная индукция в зубце B_{z2max} и в спинке якоря B_{c2} не превысила допустимых значений. В некоторых случаях возможен пересчет главных размеров машины D_2 и l_i.

Найдем размеры секций:

среднюю ширину секции $b_{c,ср}$, мм, определяем по (10.40);

средняя длина одной лобовой части обмотки якоря, мм,

$$l_{л2} = \frac{b_{c,ср}}{\sqrt{1 - [(b_{п2} + 3,5)/t_2]^2}} + h_{z2} + 40; \quad (10.55)$$

среднюю длину витка обмотки $l_{ср2}$, мм, находим по (10.43);

вылет лобовой части обмотки, мм, равен

$$l_{в2} = \frac{0,5 b_{c,ср} (b_{п2} + 3,5)/t_2}{\sqrt{1 + [(b_{п2} + 3,5)/t_2]^2}} + \frac{h_{z2}}{2} + 20. \quad (10.56)$$

Активное сопротивление обмотки якоря вычисляем по (10.45).

10.5. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Целью расчета магнитной цепи машины постоянного тока является определение МДС обмотки возбуждения на пару полюсов в режиме холостого хода. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения представляет собой сумму магнитных напряжений всех участков магнитной цепи (рис. 10.18), А,

$$F_{в0} = 2F_\delta + 2F_{z2} + F_{c2} + 2F_{z1} + 2F_m + 2F_{\delta mc} + F_{c1}; \quad (10.57)$$

здесь F_δ — магнитное напряжение воздушного зазора; F_{z2} — магнитное напряжение зубцов якоря; F_{c2} — магнитное напряжение спинки якоря; F_{z1} — магнитное напряжение зубцов полюсных наконечников главных полюсов при наличии в машине компенсационной обмотки; F_m — магнитное напряжение сердечников главных полюсов; F_{c1} — магнитное напряжение станины; $F_{\delta mc}$ — магнитное напряжение воздушного зазора между сердечником главного полюса и станиной.

Расчет магнитной цепи ведут по основному магнитному потоку, Вб, соответствующему номинальной ЭДС якоря $E_{2ном}$ в режиме холостого хода:

$$\Phi = 60 a_2 E_{2ном}/p N_2 n, \quad (10.58)$$

где $E_{2ном}$ — номинальное значение ЭДС якоря, В:

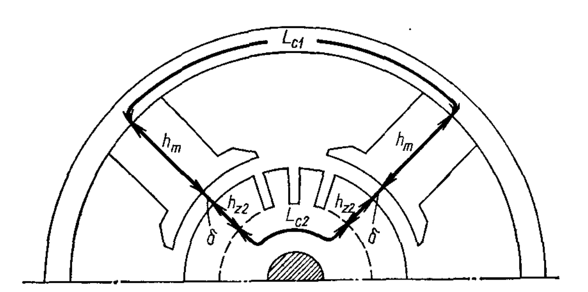


Рис. 10.18. Расчетный участок магнитной цепи четырехполюсной машины постоянного тока

для генератора

$$E_{2ном} = 0,5 U_{ном} (3 - \eta'_{ном}); \quad (10.59)$$

для двигателя

$$E_{2ном} = 0,5 U_{ном} (1 + \eta'_{ном}); \quad (10.60)$$

$\eta'_{ном}$ — предварительное значение КПД машины при номинальной нагрузке (см. табл. 10.1 или рис. 10.2).

Магнитные напряжения участков магнитной цепи машины постоянного тока определяют следующим образом.

Магнитное напряжение воздушного зазора, А,

$$F_\delta = 0,8 B_\delta \delta k_\delta \cdot 10^3, \quad (10.61)$$

где B_δ — магнитная индукция в зазоре, Тл:

$$B_\delta = \Phi \cdot 10^6 / \alpha'_i \tau l_i; \quad (10.62)$$

δ — среднее значение воздушного зазора (см. рис. 10.9), мм; k_δ — коэффициент воздушного зазора, учитывающий влияние на магнитное сопротивление зазора наличия пазов в полюсных наконечниках главных полюсов $k_{\delta 1}$, пазов сердечника якоря $k_{\delta 2}$, бандажных канавок на сердечнике якоря $k_б$:

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} k_б. \quad (10.63)$$

При полузакрытых пазах в полюсных наконечниках главных полюсов (рис. 10.19) и в сердечнике якоря

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{ш1}}{t_1 - b_{ш1} + 5 \frac{\delta t_1}{b_{ш1}}}; \quad (10.64)$$

здесь $b_{ш1}$ — ширина шлица полузакрытого паза, $b_{ш1}=3$ мм; t_1 — зубцовое деление полюсного наконечника главного полюса, предварительно можно принять $t_1 \approx (1{,}2 \div 1{,}5)\, t_2$, мм:

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{п2}}{t_2 - b_{п2} + 5\,\dfrac{\delta t_2}{b_{п2}}} . \qquad (10.65)$$

При открытых пазах в (10.64) и (10.65) вместо ширины шлица $b_{ш1}$ и $b_{ш2}$ следует подставить соответственно ширину паза $b_{п1}$ и $b_{п2}$. В некомпенсированных машинах принимают $k_{\delta 1}=1$.

Расчет коэффициента, учитывающего наличие бандажных канавок на якоре, зависит от вида бандажа:

при бандаже из стеклоленты или немагнитной проволоки

$$k_б = 1 + \frac{n_б\, l_б\, h_б}{l_2\,(\delta + h_б) - n_б\, l_б\, h_б} ; \qquad (10.66)$$

при бандаже из магнитной проволоки

$$k_б = 1 + \frac{n_б\, l_б\,(h_б - 0{,}8d)}{l_2\,(\delta_б + h_б - 0{,}8d) - n_б\, l_б\,(h_б - 0{,}8d)} . \qquad (10.67)$$

В этих выражениях $n_б$ — число бандажных канавок ($n_б = 2 \div 4$); $l_б$ — длина бандажной канавки, мм; $h_б$ — высота бандажной канавки ($h_б = 3$ мм); d — диаметр бандажной проволоки, мм:

$$d \approx 0{,}5 h_б. \qquad (10.68)$$

В машинах постоянного тока серии 2П первой длины (М) $n_б l_б = 0{,}35\, l_2$, а второй длины (L) того же диаметра якоря $n_б l_б = 0{,}25\, l_2$.

Магнитное напряжение зубцового слоя якоря. Его определяют по формулам, приведенным в § 5.7, *в*, применительно к расчету магнитного напряжения зубцового слоя ротора асинхронных двигателей при овальных полузакрытых пазах по (5.169) — (5.172), а для прямоугольных открытых пазов — по (5.185) — (5.189). При этом необходимо иметь в виду: при магнитной индукции в зубце $B_{z2} \leqslant 1{,}8$ Тл напряженность магнитного поля H_{z2} определяют по основной таблице намагничивания для соответствующей марки стали (см. приложение П.2), а при $B_{z2} > 1{,}8$ Тл напряженность H_{z2} определяют по кривым намагничивания зубцов якоря машин постоянного тока (см. рис. П.2.3 или П.2.4), предварительно рассчитав коэффициент $k_{п2}$, учитывающий ответвление части магнитного потока в паз якоря.

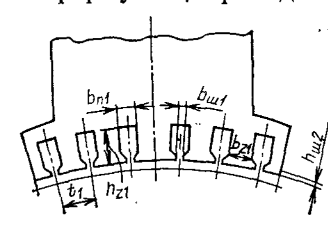


Рис. 10.19. Зубцовый слой наконечника главного полюса компенсированной машины постоянного тока

Магнитное напряжение спинки якоря, А,

$$F_{c2} = H_{c2}\, L_{c2} \cdot 10^{-3}. \qquad (10.69)$$

Магнитную индукцию в спинке якоря B_{c2} определяют по (10.28), где вместо предварительного значения индукции B'_δ подставляют B_δ по (10.62).

Напряженность магнитного поля H_{c2}, А/м, определяют по основной таблице намагничивания для соответствующей марки стали (см. приложение П.2).

Расчетная длина магнитной силовой линии в спинке якоря, мм,

$$L_{c2} = (\pi/2p)\,(D_{2вн} + h_{c2}) + h_{c2}. \qquad (10.70)$$

Магнитное напряжение зубцового слоя полюсных наконечников главных полюсов, А,

$$F_{z1} = H_{z1}\, h_{z1} \cdot 10^{-3}. \qquad (10.71)$$

Магнитная индукция в сечении зубца на высоте 1/3 от его основания

$$B_{z1(1/3)} = \frac{\sigma_г\, \Phi \cdot 10^6}{l_m\, k_{c1}\,(b_{п,н1/3} - Z_1\, b_{п1})} , \qquad (10.72)$$

где $\sigma_г$ — коэффициент магнитного рассеяния главных полюсов: при $2p=2$ $\sigma_г=1{,}15$; при $2p=4$ без компенсационной обмотки $\sigma_г=1{,}2$, для машин с компенсационной обмоткой $\sigma_г=1{,}25$; $q_{п,н(1/3)}$ — длина дуги полюсного наконечника на расстоянии $^1/_3$ от основания зубцов, мм:

$$b_{п,н(1/3)} = b_{п,н}\left[1 + \left(\frac{2}{3}\, h_{z1}\right)/(D_2 + 2\delta)\right]; \qquad (10.73)$$

$b_{п,н}$ — длина дуги полюсного наконечника главного полюса, мм: для компенсированных машин $b_{п,н} = \alpha'_i\, \tau + 2\delta$, для некомпенсированных машин $b_{п,н} = \alpha'_i \tau$.

Напряженность магнитного поля H_{z1} определяют по таблице намагничивания электротехнической стали марки 3411 (табл. П.2.10).

Магнитное напряжение сердечника главного полюса, А,

$$F_m = H_m\, L_m \cdot 10^{-3}, \qquad (10.74)$$

где L_m — расчетная длина магнитной силовой линии в главном полюсе:

для компенсированных машин, мм,

$$L_m = h_m - h_{z1};$$

для некомпенсированных машин, мм,

$$L_m = h_m.$$

Магнитная индукция в сердечнике главного полюса, Тл,

$$B_m = \sigma_г\, \Phi \cdot 10^6 / l_m\, k_{c1}\, b_m. \qquad (10.75)$$

Напряженность магнитного поля H_m определяют по таблице намагничивания для стали марки 3411.

18—782

Магнитное напряжение зазора между главным полюсом и станиной, А,

$$F_{\delta mc} = 0{,}8 B_m \, \delta_{mc1} \cdot 10^3, \tag{10.76}$$

где δ_{mc1} — эквивалентный воздушный зазор, учитывающий неплотное прилегание сердечника полюса к станине, мм;

$$\delta_{mc1} = 2 l_m \cdot 10^{-4} + 0{,}1. \tag{10.77}$$

Для машин с высотой оси вращения $h \geqslant 355$ мм значением $F_{\delta mc}$ можно пренебречь.

Магнитное напряжение станины, А,

$$F_{c1} = H_{c1} L_{c1} \cdot 10^{-3}. \tag{10.78}$$

Магнитная индукция в спинке станины, Тл,

$$B_{c1} = \sigma_г \Phi \cdot 10^6 / 2 l_{c1} h_{c1}. \tag{10.79}$$

Если полученное по (10.79) значение B_{c1} оказалось меньше принятого в (10.10), то высоту спинки станины h_{c1} можно уменьшить, а если B_{c1} оказалось больше принятого по (10.10), то h_{c1} следует увеличить.

Напряженность поля H_{c1} определяют по кривой намагничивания для массивных станин (см. табл. П.2.12).

Расчетная длина магнитной силовой линии в станине, мм,

$$L_{c1} = \frac{\pi}{2p}(D_{1вн} + h_{c1}) + h_{c1}. \tag{10.80}$$

10.6. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Обмотка возбуждения должна создавать МДС, достаточную для наведения в машине магнитного потока, соответствующего номинальной ЭДС, и компенсации размагничивающего действия реакции якоря при нагрузке машины.

В современных машинах постоянного тока щетки, как правило, устанавливают на геометрической нейтрали, а магнитная система машин насыщена. Это позволяет при расчете размагничивающего действия реакции якоря принимать во внимание лишь ее поперечную составляющую F_{qd}. Исходя из этого требуемое значение МДС обмотки возбуждения при нагрузке машины на пару полюсов, А, определяется выражением

$$F_{в,н} = F_{в0} + F_{qd} - F_c, \tag{10.81}$$

где F_{qd} — размагничивающее действие реакции якоря по поперечной оси на пару полюсов, А; F_c — МДС стабилизирующей обмотки машины на пару полюсов, А.

В машинах с компенсационной обмоткой составляющая $(F_{qd} - F_c)$ принимается равной нулю. Количественный учет размагничивающего действия реакции якоря усложнен тем, что МДС поперечной реакции якоря действует перпендикулярно магнитному потоку возбуждения и вызывает его искажение. Возникающее

при этом размагничивание машины обусловлено ее магнитным насыщением. В итоге подмагничивание происходит в меньшей степени, чем размагничивание.

Размагничивающее действие реакции якоря по поперечной оси можно учесть введением коэффициента $k_{р,я}$. Этот коэффициент был получен в результате исследования большого количества некомпенсированных машин постоянного тока при разных значениях магнитной индукции в зубцах якоря B_{z2} [1]. Размагничивающее действие МДС поперечной реакции якоря на пару полюсов А, определяют по формуле

$$F_{qd} = k_{р,я} F_2. \tag{10.82}$$

Коэффициент $k_{р,я}$ находят по рис. 10.20 в зависимости от магнитной индукции в зубце якоря B_{z2}, рассчитанной по (5.169) в

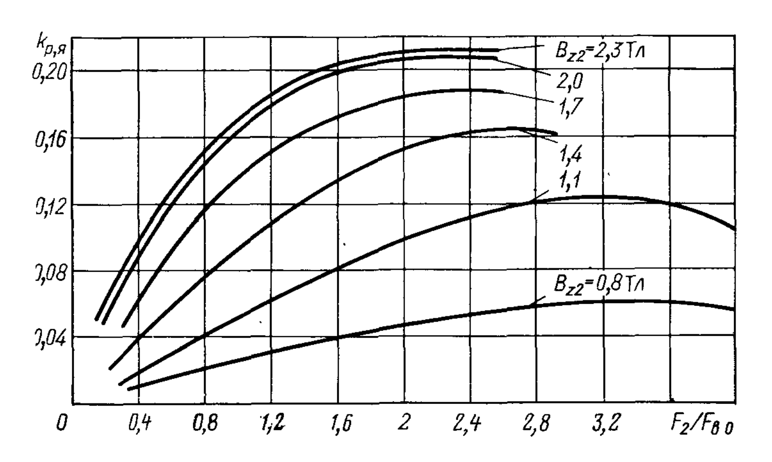


Рис. 10.20. Зависимость $k_{р,я}$ от $F_2/F_{в0}$

случае овальных полузакрытых пазов или по (5.184) в случае прямоугольных открытых пазов. Поперечная МДС обмотки якоря на пару полюсов, А,

$$F_2 = 0{,}5 N_2 I_{2ном} / 2 a_2 p. \tag{10.83}$$

В двигателях постоянного тока с высотой оси вращения $h = 80 \div 315$ мм для частичной компенсации реакции якоря и в целях обеспечения устойчивости работы двигателя в возможном диапазоне нагрузки на главных полюсах располагают *стабилизирующую обмотку*, которую включают последовательно с обмоткой якоря и обмоткой добавочных полюсов. Следует иметь в виду, что применение стабилизирующей обмотки усложняет реверс двигателя, так как требует переключения выводов этой обмотки.

У машин с высотой оси вращения до 200 мм включительно полюсные катушки обмоток параллельного или независимого возбуждения выполняют несекционированными (табл. 10.13). В машинах с $h > 200$ мм полюсные катушки главных полюсов делают

Таблица 10.13. Изоляция обмоток главных (*а*) и добавочных (*б*) полюсов машин постоянного тока ($h = 80 \div 200$ мм, напряжение — до 600 В, изоляция — классов нагревостойкости B, F, H)

Позиция на рисунке	Назначение	Материал: Класс B	Материал: Класс F	Материал: Класс H	Толщина, мм	Число слоев
1	Изоляция сердечника (напыление)	Эпоксидная смола			1,0	—
2	Изоляция катушки	Лакотканеслюдопласт			0,25	1
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ		
3	Изоляция катушки	Стеклянная лента ЛЭС			0,1	1 вполнахлеста
4	Рамка	Стеклотекстолит			0,5	1
		СТ	СТЭФ	СТК		

секционированными, т. е. разделяют их по высоте на части, оставляя между ними вентиляционные каналы (табл. 10.14 и 10.15). Такая конструкция полюсных катушек имеет большую поверхность охлаждения, что дает возможность повысить плотность тока в обмотке и уменьшить массу меди.

Средняя длина витка многослойной полюсной катушки параллельного или независимого возбуждения из изолированных проводов, мм,

$$l_{\text{ср,к}} = 2(l_m + b_m) + \pi (b_{\text{к,ш}} + 2b_{\text{из}} + 2b_{\text{з}} + 2b_{\text{к}}), \qquad (10.84)$$

где $b_{\text{к,ш}}$ — ширина катушки (рис. 10.21), мм; $b_{\text{из}}$ — толщина изоляции катушки, мм, принимается по табл. 10.13—10.15; $b_{\text{к}}$ — толщина каркаса катушки, мм; $b_{\text{з}}$ — односторонний зазор между катушкой и сердечником полюса, принимаемый равным 0,5—0,8 мм.

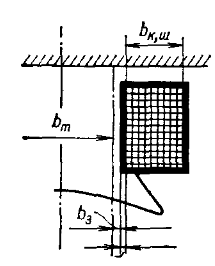


Рис. 10.21. К определению размеров катушки главных полюсов

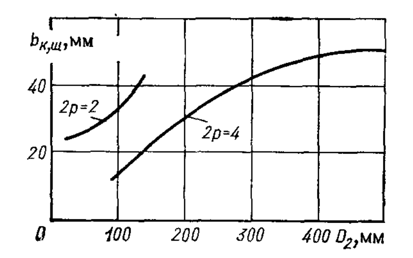


Рис. 10.22. Средние значения ширины многослойной катушки возбуждения $b_{\text{к,ш}}$ из изолированного провода

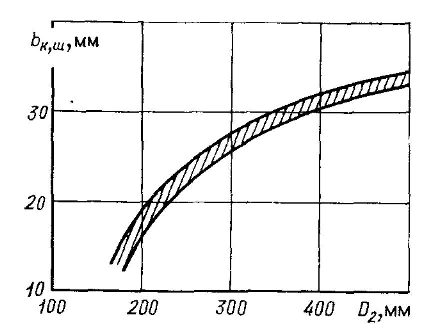


Рис. 10.23. Средние значения ширины полюсной катушки $b_{\text{к,ш}}$ из неизолированной меди прямоугольного сечения

Ширину полюсной катушки $b_{\text{к,ш}}$ предварительно определяют по рис. 10.22. После вычерчивания эскиза междуполюсного окна размеры катушки уточняются (см. § 10.10).

Средняя длина витка однослойной по ширине катушки из неизолированной шинной медной проволоки, намотанной на ребро, мм,

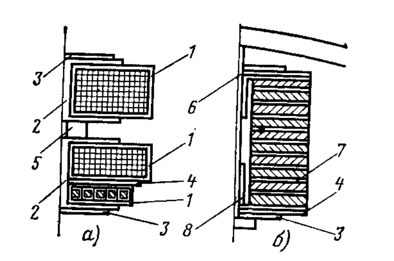


Таблица 10.14. **Изоляция обмоток главных (*а*) и добавочных (*б*) полюсов машин постоянного тока ($h=225 \div 315$ мм, напряжение — до 600 В, изоляция — классов нагревостойкости В, F, Н)**

Позиция на рисунке	Назначение	Материал: Класс В	Материал: Класс F	Материал: Класс Н	Толщина, мм	Число слоев
1	Изоляция катушки	Стеклянная лента ЛЭС			0,1	1 вполнахлеста
2	Каркас	Стеклолакоткань			2,0	1
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИТ-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ		
3	Рамка	Сталь Ст3			1,5	1
4	Рамка	Стеклотекстолит			1,5	1
		СТ	СТЭФ	СТК		
5	Скоба	Сталь Ст3			8—10	1
6	Изоляция сердечника	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий-F	Синтофолий-Н	0,16	7,5
7	Прокладка междувитковая	Бумага асбестовая	Бумага фенилоновая 0,2×2=0,4 мм		0,4*	1
8	Изоляция углов	Лента стеклянная ЛЭС			0,1	1 вполнахлеста

* Для класса нагревостойкости В толщина 0,3 мм.

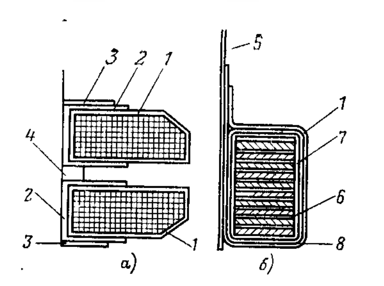


Таблица 10.15. **Изоляция обмоток главных (*а*) и добавочных (*б*) полюсов машин постоянного тока ($h=355 \div 500$ мм, напряжение — до 1000 В, изоляция — классов нагревостойкости В, F, Н)**

Позиция на рисунке	Назначение	Материал: Класс В	Материал: Класс F	Материал: Класс Н	Толщина, мм	Число слоев
1	Изоляция катушки	Стеклянная лента ЛЭС			0,1	1 вполнахлеста
2	Каркас	Стеклолакоткань			3,5	1
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСД		
3	Рамка	Сталь Ст3			2—3	1
4	Скоба	Сталь Ст3			8—12	1
5	Изоляция сердечника	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий F	Синтофолий Н	0,15	7,5
6	Прокладка междувитковая	Асбестовая бумага		Фенилоновая бумага 0,2 мм×2	0,4	1
7	Изоляция катушки	Стеклослюдинитовая лента ЛС-ПЭ-934-ТП		Пленка полиимидная ПМ 0,05 мм×3	0,15	7
8	Хомут	Латунь Л62			2,0	1

$$l_{ср.к} = 2(l_m + b_m) + \pi (b_{к,ш} + 2r). \quad (10.85)$$

Радиус закругления медной проволоки, мм.

$$r = 0{,}5(b_m + 2b_з + 2b_{из}). \quad (10.86)$$

Из соображений технологичности радиус закругления должен быть не менее

$$r \geqslant 0{,}05b^2/a. \quad (10.87)$$

Ширина катушки из неизолированной медной проволоки $b_{к,ш}$ равна большему размеру шины. Предварительно $b_{к,ш}$ принимают по рис. 10.23. После определения площади поперечного сечения проволоки этот размер уточняют в соответствии с бóльшим размером выбранной медной проволоки (см. табл. П.1.2).

При последовательном соединении всех полюсных катушек главных полюсов площадь поперечного сечения проволоки равна, мм,

$$q'_в = F_{в,н} k_{зап} \rho_{Cu} p l_{ср,к} \cdot 10^3/U_в, \quad (10.88)$$

где $U_в$ — напряжение возбуждения, В; при независимом возбуждении машины оно может отличаться от напряжения якоря; ρ_{Cu} —

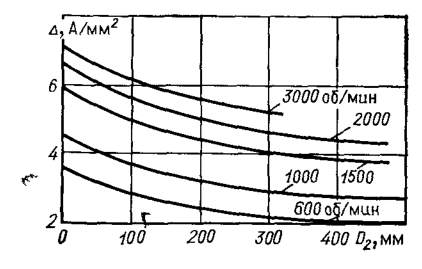


Рис. 10.24. Средние значения плотности тока в полюсных катушках машин постоянного тока

удельное электрическое сопротивление меди при расчетной рабочей температуре, принимают по табл. 2.1; $k_{зап}$ — коэффициент запаса МДС обмотки возбуждения, учитывающий возможность отклонения реальных параметров магнитной цепи и обмоток от расчетных: для генераторов $k_{зап} = 1{,}1 \div 1{,}2$; для двигателей $k_{зап} = 1{,}05$.

Полученное значение $q_в$ округляют до ближайшего стандартного значения (см. табл. П.1.2), а затем по табл. 10.16 выбирают марку обмоточного провода и тип полюсной катушки.

Число витков в полюсной катушке возбуждения

$$w_{к,в} = F_{в,н}/(2\Delta_в q_в), \quad (10.89)$$

где $\Delta_в$ — плотность тока в обмотке возбуждения, А/мм².

Средние значения $\Delta_в$ машин постоянного тока защищенного исполнения (IP22) со способом охлаждения IC01 можно принять по рис. 10.24. Принятое значение $\Delta_в$ необходимо привести в соответствие с классом нагревостойкости изоляции обмотки, умножив его на коэффициент, приведенный в табл. 10.3 (см. строку A_2).

Таблица 10.16

$q_в$, мм²	Класс нагревостойкости изоляции	Марка провода	Тип катушки
До 3	B F	ПЭТВ ПЭТ-155	Многослойная по ширине и высоте из проводов круглого сечения
От 3 до 8	B F H	ПСД ПСД ПСДК	
От 8 до 25	B F H	ПСД ПСД ПСДК	Многослойная по ширине и высоте из проводов прямоугольного сечения
Более 25	Всех классов	Неизолированная медная проволока	Однослойная по ширине из неизолированной медной проволоки, намотанной на ребро

Сопротивление обмотки возбуждения, Ом,

$$r_в = \rho_{Cu} 2p w_{к,в} l_{ср,к} \cdot 10^3/q_в. \quad (10.90)$$

Наибольшее значение тока в обмотке возбуждения, А,

$$I_в = U_в/r_в. \quad (10.91)$$

Уточненное значение плотности тока в обмотке возбуждения, А/мм²,

$$\Delta_в = I_в/q_в \quad (10.92)$$

не должно превышать рекомендуемое значение по рис. 10.24 более чем на 5 %.

10.7. РАСЧЕТ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ ОБМОТКИ

Число витков в полюсной катушке стабилизирующей обмотки

$$w_{к,с} = F_с a_с/2I_2, \quad (10.93)$$

где $a_с$ — число параллельных ветвей в обмотке, равное 1 или 2; $F_с$ — МДС стабилизирующей обмотки на пару полюсов некомпенсированной машины постоянного тока, А:

$$F_с = (0{,}1 \div 0{,}2) F_2. \quad (10.94)$$

Площадь поперечного сечения провода стабилизирующей обмотки, мм²,

$$q'_с = I_2/a_с \Delta_с; \quad (10.95)$$

здесь $\Delta_с$ — плотность тока в стабилизирующей обмотке, А/мм².

Для машин постоянного тока защищенного исполнения (IP22) со способом охлаждения IC01 $\Delta_с$ можно принять по рис. 10.24.

Полученное по (10.95) значение $q'_с$ округляют до ближайшего стандартного значения $q_с$ (см. табл. П.1.2), а затем по табл. 10.17 выбирают тип катушки и марку обмоточного провода.

Таблица 10.17

q_c, мм²	Класс нагревостойкости изоляции	Марка провода	Тип катушки
До 8	B F H	ПСД ПСД ПСДК	Однослойная или многослойная из проводов круглого сечения
От 8 до 25	B F H	ПСД ПСД ПСДК	Однослойная или многослойная из проводов прямоугольного сечения
Более 25	Всех классов	Неизолированная медная проволока	Однослойные по ширине из неизолированной медной проволоки, намотанной на ребро

Затем уточняют плотность тока в стабилизирующей обмотке, А/мм²,

$$\Delta_c = I_2/a_c q_c, \quad (10.96)$$

которая не должна превышать рекомендуемое значение.

Среднюю длину витка многослойной стабилизирующей полюсной катушки из изолированного провода определяют по (10.84), но вместо $b_{к,ш}$ следует подставить значение $b_{к,с}$, принятое по рис. 10.25, *а*.

Среднюю длину витка однослойной по ширине полюсной катушки из голой неизолированной медной проволоки, намотанной на ребро, определяют по (10.85). Ширину катушки $b_{к,с}$ в этом случае определяют по рис. 10.25, *б*.

Сопротивление стабилизирующей обмотки, Ом,

$$r_c = \frac{2p\rho_{Cu}\, l_{ср,к}\, w_{к,с}\cdot 10^3}{a_c^2 q_c}. \quad (10.97)$$

Конструктивно стабилизирующую обмотку располагают на главных полюсах либо у полюсного наконечника, либо между секциями обмотки возбуждения. В последнем случае катушка стабилизирующей обмотки выполняет роль разделительной прокладки между секциями катушки возбуждения.

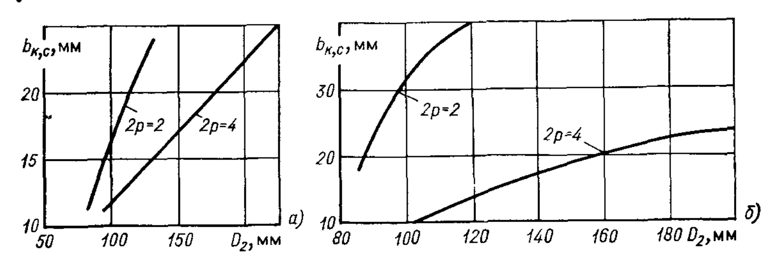


Рис. 10.25. Средние значения ширины полюсной катушки стабилизирующей обмотки $b_{к,с}$:
а — многослойной; *б* — однослойной

10.8. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Назначение добавочных полюсов состоит в создании в зоне коммутации МДС $F_д$, достаточной для компенсации МДС реакции якоря F_2 и сверх того — создания в этой зоне магнитного поля, необходимого для наведения в коммутируемых секциях ЭДС вращения $e_к$, направленной встречно реактивной ЭДС $e_р$.

У некомпенсированных машин постоянного тока число витков катушки добавочного полюса

$$w_{к,д} = k_д F_2 a_д / 2I_2, \quad (10.98)$$

где $k_д = F_д/F_2$ — коэффициент, учитывающий требуемое превышение МДС обмотки добавочных полюсов $F_д$ над поперечной МДС обмотки якоря F_2; $a_д$ — число параллельных ветвей обмотки добавочных полюсов; F_2 — МДС обмотки якоря на пару полюсов (10.83), А

Предварительное значение коэффициента $k_д$ принимают по табл. 10.18, составленной на основании опыта проектирования машин постоянного тока.

Число параллельных ветвей обмотки добавочных полюсов принимают $a_д = 1$ при токе якоря $I_2 < 1000$ А и лишь при $I_2 \geqslant 1000$ А принимают $a_д = 2$.

Число витков $w_{к,д}$, полученное по (10.98), округляют до целого числа.

Площадь поперечного сечения провода катушки добавочного полюса, мм²,

$$q'_д = I_2/a_д \Delta_д, \quad (10.99)$$

где $\Delta_д$ — плотность тока в обмотке добавочных полюсов, А/мм², для машин защищенного исполнения (IP22) со способом охлаждения IC01 $\Delta_д$ принимают по рис. 10.24 с учетом поправочного коэффициента на класс нагревостойкости применяемой изоляции.

Полученное значение $q'_д$ округляют до ближайшего стандартного сечения (см. табл. П.1.2) и уточняют плотность тока, А/мм²,

$$\Delta_д = I_2/a_д q_д, \quad (10.100)$$

которая не должна превышать рекомендуемое значение.

Тип полюсной катушки и форму сечения провода принимают в соответствии с рекомендациями табл. 10.19. Тип обмоточного провода для многослойных катушек добавочных полюсов принимают по табл. 10.17.

Таблица 10.18

h, мм	$2p$	$2p_д$	$k_д$
80—100	2	1	1,35—1,45
112—315	4	4	1,20—1,30
355—500	4	4	1,25—1,35

Таблица 10.19

$q_д$, мм²	Тип катушки добавочного полюса
До 8	Многослойные по ширине и высоте катушки из изолированного провода круглого сечения
От 8 до 25	Многослойные по ширине и высоте катушки из изолированного провода прямоугольного сечения
Более 25	Однослойные по ширине катушки неизолированной медной проволоки, гнутой на ребро

Обмоточный провод прямоугольного сечения должен иметь отношение большей стороны к меньшей в пределах 1,4—1,8.

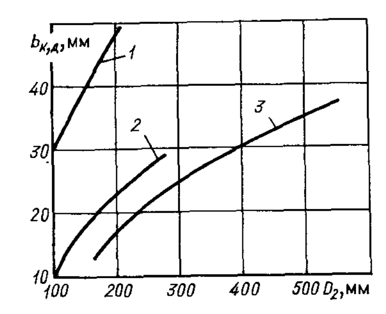


Рис. 10.26. Средние значения ширины полюсной катушки обмотки добавочных полюсов $b_{к,д}$:

1 — многослойные катушки из изолированных проводов при $2p_д=1$; 2 — то же при $2p_д=4$; 3 — однослойные катушки из неизолированной меди, гнутой на ребро, при $2p_д=4$

Средняя длина витка катушки добавочного полюса из изолированных проводов, мм,

$$l_{ср,к} = 2(l_д + b_д) + \pi(b_{к,д} + 2b_{из} + 2b_з), \qquad (10.101)$$

где $l_д$ и $b_д$ — соответственно длина и ширина сердечника добавочного полюса (см. § 10.3), мм; $b_{из}$ — односторонняя толщина изоляции сердечника полюса (см. табл. 10.13—10.15), мм; $b_з$ — односторонний зазор между изолированным сердечником полюса и катушкой, мм:

$$b_з \approx 0{,}23\sqrt[3]{D_2}. \qquad (10.102)$$

Ширину многослойной катушки добавочного полюса $b_{к,д}$ из изолированного провода предварительно можно принять по рис. 10.26. Для однослойной катушки из неизолированной медной проволоки среднюю длину витка катушки определяют по формуле, мм,

$$l_{ср,к} = 2l_д + \pi(b_д + b_{к,д} + 2b_з + 2b_{из}), \qquad (10.103)$$

где $b_{из}=2$ мм; $b_з=3$ мм, $b_{к,д}$ — ширина катушки, равная большему размеру меди, предварительно можно принять по рис. 10.26.

Радиус закругления медной проволоки, гнутой на ребро, определяется по (10.86), а его минимальное значение должно удовлетворять требованию (10.87).

Сопротивление обмотки добавочных полюсов, Ом,

$$r_д = \frac{\rho_{Cu}\, l_{ср,к}\, w_{к,д}\, 2p_д \cdot 10^3}{a_д^2 q_д}. \qquad (10.104)$$

В случае компенсированной машины постоянного тока число витков катушки добавочного полюса

$$w_{к,д} = (k_д F_2 - F_1)\, a_д / I_2, \qquad (10.105)$$

где $k_д$ принимают по табл. 10.18; F_1 — МДС компенсационной обмотки, А.

У компенсированных машин постоянного тока обмотка добавочных полюсов соединяется последовательно с компенсационной обмоткой, поэтому число параллельных ветвей в обеих обмотках должно быть одинаковым.

В случае двух параллельных ветвей в одну ветвь включают последовательно все катушки северных магнитных полюсов, а в другую — южных. При таком включении неравномерность распределения токов между ветвями не вызывает нарушения равенства потоков магнитных полюсов машины, так как МДС каждой пары полюсов остается неизменной. Достоинством применения двух параллельных ветвей в обмотках добавочных полюсов и компенсационной является возможность осуществления схемы соединений, при которой вокруг вала не создается виток с током, что устраняет намагничивание вала и возникновение подшипниковых токов.

10.9. РАЗМЕЩЕНИЕ КАТУШЕК ГЛАВНЫХ И ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ В МЕЖДУПОЛЮСНОМ ОКНЕ

После расчета обмоток статора следует проверить возможность их размещения в междуполюсном окне. С этой целью определяют ширину катушек $b_к$ и их высоту $h_к$ и выполняют эскиз межполюсного окна в масштабе. Воздушный промежуток между выступающими краями катушек главных и добавочных полюсов у машин с высотой оси вращения $h \leqslant 200$ мм должен быть не менее 6 мм, а у машин с $h > 200$ мм — не менее 8 мм. Такие же воздушные промежутки должны быть между выступающими краями катушек и внутренней поверхностью станины.

При расчете размеров $b_к$ и $h_к$ следует учитывать разбухание катушек при их пропитке. При обмоточных проводах круглого сечения коэффициент разбухания $k_р$ принимают в зависимости от диаметра провода:

d, мм	<0,77	0,8—1,56	1,62—3,05
$K_р$	1,06	1,05	1,04

При обмоточных проводах прямоугольного сечения коэффициент $k_р$ принимают в зависимости от площади поперечного сечения провода:

q, мм²	8—14	14—25
$K_р$	1,05	1,06

При этом предполагается, что провода с $q=8\div14$ мм² имеют эмалевую изоляцию.

Размеры катушек определяют по следующим формулам:

а) при обмоточных проводах круглого сечения, мм:

по ширине

$$b_к = k_р N_ш d_{из} + b_{из,пр}; \qquad (10.106)$$

по высоте

$$h_к = k_р N_в d_{из} + h_{из,пр} + b_{в,к}; \qquad (10.107)$$

б) при проводах прямоугольного сечения, мм:

по ширине

$$b_к = k_р N_ш b_{из} + b_{из,пр}; \qquad (10.108)$$

по высоте

$$h_к = k_р N_в h_{из} + h_{из,пр} + b_{в,к}. \qquad (10.109)$$

В этих выражениях $N_ш$ и $N_в$ — числа проводников по ширине и высоте катушки или ее участка; $d_{из}$ — диаметр обмоточного провода с изоляцией, мм; $b_{из}$ и $h_{из}$ — размеры прямоугольного обмоточного провода по ширине и высоте, мм; $b_{из,пр}$ и $h_{из,пр}$ — размеры изоляционных прокладок и каркаса катушки по ширине и высоте (см. табл. 10.13—10.15); $b_{в,к}$ — ширина вентиляционного канала.

Провода прямоугольного сечения наматываются на каркас «плашмя», т. е. большей стороной провода перпендикулярно оси полюса.

В случае однослойных катушек из неизолированной медной проволоки, намотанной на ребро, ширина катушки $b_к$ равна большему размеру шины, т. е. ее ширине. При расчете высоты такой катушки коэффициент разбухания принимают равным $k_р=1{,}03$.

Высота катушки из неизолированной медной проволоки, мм

$$h_к = k_р [w_к h + 0{,}3 (w_к - 3)] + 2, \qquad (10.110)$$

где h — меньший размер (высота) шины, мм.

В целях уменьшения магнитного рассеяния катушки добавочных полюсов располагают возможно ближе к полюсному наконечнику. Если же выполнение эскиза полюсного окна (см. рис. 10.43) показало, что катушки в полюсном окне не размещаются, то следует либо увеличить диаметр станины, если это возможно, либо повысить плотность тока в обмотке возбуждения, применив изоляцию более высокого класса нагревостойкости.

10.10. РАСЧЕТ КОМПЕНСАЦИОННОЙ ОБМОТКИ

Компенсационная обмотка должна создавать МДС на один полюс, приблизительно равную МДС якоря:

$$F \approx 0{,}5 A_2 b_p \cdot 10^{-3}, \qquad (10.111)$$

где b_p — длина дуги полюсного наконечника главного полюса, мм (10.9).

Конструктивно компенсационную обмотку выполняют в виде однослойной катушечной или стержневой обмотки. Пазовые части секций располагают в пазах полюсных наконечников главных полюсов (см. рис. 10.19).

На рис. 10.27 представлена развернутая схема компенсационной стержневой обмотки с обмоткой добавочных полюсов.

Наибольшее применение получили стержневые обмотки с прямоугольными полузакрытыми пазами в полюсных наконечниках главных полюсов.

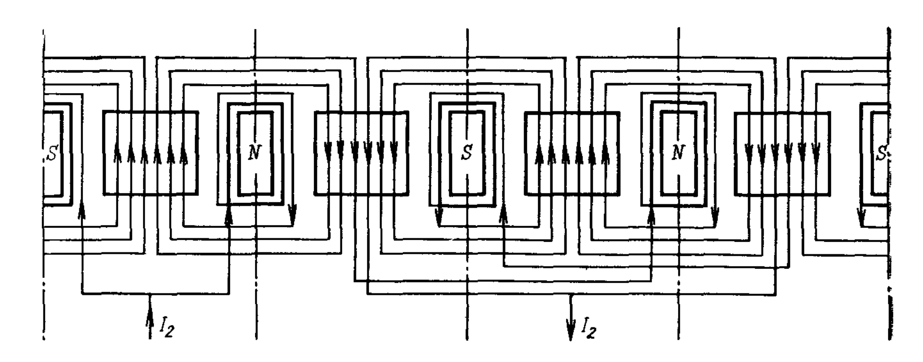


Рис. 10.27. Развернутая схема компенсационной обмотки, соединенной с обмоткой добавочных полюсов ($2p=4$, $a_1=a_д=2$, $Z_1=6$)

Число стержней обмотки на один полюс

$$N_1 = 2F_1 a_1 / I_2. \qquad (10.112)$$

Число пазов на полюс

$$Z_1 = N_1 / u_п, \qquad (10.113)$$

где $u_п$ — число стержней, располагаемых по ширине паза; при $u_п=1$ $Z_1=N_1$.

Число пазов Z_1 округляют до ближайшего четного числа. В машинах с высотой оси вращения $h=355\div500$ мм, $Z_1=6\div12$. Кроме того, чтобы избежать вибраций магнитного происхождения, при выборе Z_1 необходимо соблюдение условия

$$Z_1 \neq (0{,}9\div1{,}1) Z_2 \alpha_i / 2p. \qquad (10.114)$$

Если это невозможно, то применяют скос пазов на одно зубцовое деление.

Затем уточняют МДС компенсационной обмотки, А,

$$F_1 = N_1 I_2 / 2a_1, \qquad (10.115)$$

которая должна быть в пределах, определяемых выражением (10.111).

Зубцовое деление в наиболее узком расчетном сечении зубцов полюсного наконечника, мм,

$$t_{1min} = \frac{b_p}{Z_1} \frac{D_2 + 2\delta + 2h_{ш1}}{D_2 + 2\delta}, \qquad (10.116)$$

где $h_{ш1}$ — высота шлица паза, $h_{ш1} = 0{,}5$ мм.

Ширина зубца в наиболее узком месте, мм,

$$b_{z1min} = t_{1min} B_\delta \, \sigma_{mн}/k_c B_{z1max}, \qquad (10.117)$$

где $\sigma_{mн} \approx 1{,}05$ — коэффициент магнитного рассеяния наконечника главного полюса; $B_{z1max} = 1{,}6 \div 1{,}8$ Тл — магнитная индукция в наиболее узком расчетном сечении зубца.

Ширина паза в штампе, мм,

$$b_{п1} = t_{1min} - b_{z1min}. \qquad (10.118)$$

Допустимая ширина стержня обмотки, мм,

$$b_{ст1} = (b_{п1} - b_{из} - b_{пр})/u_п, \qquad (10.119)$$

где $b_{из}$ — общая толщина изоляции в пазу по ширине, при $u_п = 1$ $b_{из} = 1{,}6$ мм, при $u_п = 2$ $b_{из} = 2{,}5$ мм (табл 10.20); $b_{пр} = 0{,}3$ мм — припуск на сборку полюса по ширине паза.

Полученное по (10. 119) значение $b_{ст1}$ округляют до ближайшего стандартного значения (табл. П.1.2).

Площадь поперечного сечения стержня, мм^2,

$$q_1 = I_2/a_1 \Delta_1; \qquad (10.120)$$

здесь Δ_1 — плотность тока в стержне компенсационной обмотки, А/мм^2. Значение Δ_1 принимают в зависимости от класса нагревостойкости изоляции:

Класс нагревостойкости изоляции	B	F	H
Δ_1, А/мм^2	4,7—5,2	5,3—5,8	6,0—6,6

Высоту стержня, мм,

$$h_{ст1} = q_1/b_{ст1} \qquad (10.121)$$

округляют до ближайшего стандартного значения и уточняют площадь поперечного сечения стержня q_1.

Ширина паза в штампе, мм,

$$b_{п1} = u_п \, b_{ст1} + b_{из} + b_{пр}. \qquad (10.122)$$

Плотность тока, А/мм^2,

$$\Delta_1 = I_2/a_1 q_1 \qquad (10.123)$$

не должна превышать рекомендуемого значения.

Высота паза в штампе, мм,

$$h_{z1} = h_{ст1} + h_{из} + h_{ш1} + h_{пр}, \qquad (10.124)$$

где $h_{из}$ — общая толщина изоляции по высоте паза (табл. 10.20); $h_{пр}$ — припуск на сборку полюса по высоте ($h_{пр} = 0{,}3$ мм).

Размеры паза $b_{п1}$ и h_{z1} округляют до десятых долей миллиметра.

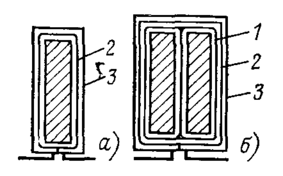


Таблица 10.20. **Изоляция компенсационной обмотки машин постоянного тока: пазы прямоугольные полузакрытые; обмотка однослойная стержневая; высота оси вращения машин 355—500 мм; напряжение — до 1000 В; изоляция — классов нагревостойкости B, F, H**

Позиция на рисунке	Материал: Наименование, марка			Материал: Толщина, мм			Число слоев			Двусторонняя толщина изоляции, мм: Рисунок, а		Двусторонняя толщина изоляции, мм: Рисунок, б	
	Класс B	Класс F	Класс H	Класс B	Класс F	Класс H	Класс H	Класс F	Класс H	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
1	Стеклослюдинитовая лента ЛС-ПЭ-994-ТП		Полиимидная пленка ПМ	0,1	0,1	0,05	1 вполнахлеста		2	—	—	0,8	0,8
2	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий F	Синтофолий H	0,15	0,16	0,16	4,5	3,5	3,5	1,1	1,1	1,1	1,1
3	Лакотканеслюдопласт ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	Фениленовая бумага		0,15	0,15	0,15	1	1	1	0,3	0,3	0,3	0,3
—	Допуск на укладку обмотки									0,2	0,4	0,3	0,4
—	Общая толщина изоляции в пазу									1,6	1,8	2,5	2,6

Длина стержня, мм,

$$l_{ст1} = l_m + 200. \tag{10.125}$$

Стержни соединяют между собой посредством соединительной дуги из неизолированной медной проволоки. Обычно соединение дуги со стержнями выполняют пайкой посредством хомутиков или без них (рис. 10.28, *а* и *б*). В местах разъема станины применяют болтовое соединение дуги со стержнем (рис. 10.28, *в*).

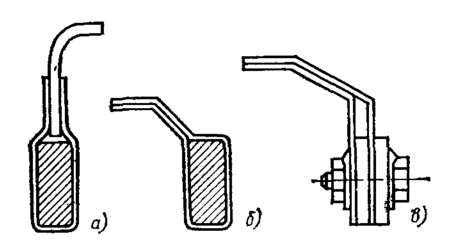


Рис. 10.28. Соединение дуг со стержнями компенсационной обмотки:

а — паянное с хомутиками; *б* — паянное без хомутиков; *в* — болтовое

Площадь поперечного сечения дуги, мм²,

$$q_{д1} = I_2/a_к \Delta_{д1}, \tag{10.126}$$

где $\Delta_{д1}$ — плотность тока в дуге, А/мм²:

$$\Delta_{1д} = (0{,}8 \div 0{,}9)\,\Delta_1.$$

Больший размер проволоки для соединительной дуги, мм,

$$h_{д1} = (1{,}6 \div 1{,}8)\,h_{ст1}. \tag{10.127}$$

Меньший размер проволоки, мм,

$$b_{д1} = q_{д1}/h_{д1}. \tag{10.128}$$

Стандартные размеры проволоки для соединительной дуги определяют по табл. П.1.2 и П.1.3.

Средняя длина соединительной дуги между стержнями, мм,

$$l_{ср.д} = 4{,}4D_2/2p. \tag{10.129}$$

Активное сопротивление компенсационной обмотки, Ом,

$$r_{к.о} = \frac{2p\rho_{Cu} N_1 \cdot 10^{-3}}{a_1^2}\left(\frac{l_{ст1}}{q_1} + \frac{l_{ср.д}}{q_{д1}}\right). \tag{10.130}$$

10.11. ЩЕТКИ И КОЛЛЕКТОР

Размеры щеток определяют соотношение размеров коллектора: уменьшение ширины щеток $b_щ$ влечет за собой увеличение длины коллектора $l_к$, а применение более широких щеток способствует уменьшению длины коллектора, но при этом расширяется зона коммутации (ширина дуги окружности якоря, в пределах которой находятся коммутируемые секции), что может послужить причиной ухудшения коммутации.

Расчетная ширина щетки, мм,

$$b'_щ \leqslant k_{з.к}\, b_{н.з} \frac{D_к}{D_2} - t_к\left(N_щ + \varepsilon_к - \frac{a_2}{p}\right); \tag{10.131}$$

здесь $k_{з,к}$ — отношение ширины зоны коммутации $b_{з,к}$ к нейтральной зоне главных полюсов $b_{н,з} = \tau - b_p$, мм; предельно допустимые значения $k_{з,к}$ приведены в табл. 10.21; $t_к$ — коллекторное деление (10.22); $N_щ$ — число щеток на коллекторе; $\varepsilon_к$ — укорочение шага обмотки якоря, принимается всегда со знаком «плюс»;

$$\varepsilon_к = (k/2p) - y_1. \tag{10.132}$$

Полученное значение $b'_щ$ округляют до ближайшего стандартного значения (табл. 10.21).

В зависимости от ширины щетки рекомендуются следующие ее длины:

$b_щ$, мм	8	10	12,5	16	20	25	32
$l_щ$, мм	10; 12,5	12,5; 16	16; 20	25; 32	25; 32	32	40

Щетки шириной 25 и 32 мм не обеспечивают полного прилегания всей поверхности к коллектору. В этом случае щетку разделяют на две шириной по 12,5 или 16 мм соответственно или же применяют более узкие щетки, а требуемая расчетная ширина $b'_щ$ достигается раздвижкой щеток на a_1 в каждом бракете по окружности коллектора путем установки прокладок между бракетами и некоторыми щеткодержателями (рис. 10.29). Перечисленные меры способствуют более надежному щеточному контакту при вибрациях и толчках.

Число перекрытых щеткой коллекторных делений

$$\gamma = b_щ/t_к. \tag{10.133}$$

Рекомендуются следующие значения γ в зависимости от типа обмотки якоря: для простой волновой $\gamma = 2 \div 4$; для простой петлевой $\gamma \geqslant (u_п + 0{,}5)$; для двухходовой петлевой $\gamma > 3$.

Необходимая контактная площадь всех щеток, мм²,

$$\Sigma S_щ = 2I_2/\Delta'_щ, \tag{10.134}$$

где $\Delta'_щ$ — плотность тока в щеточном контакте (табл. 2.2), А/мм².

Необходимая контактная площадь щеток одного бракета, мм²,

$$S_{щ.б} = \Sigma S_щ/2p. \tag{10.135}$$

Таблица 10.21

D_2, мм	70—100	Более 100 до 200	Более 200 до 400	Более 400
Предельно допустнмые значения $к_{з,к}$	0,75	0,75	0,70	0,60
Стандартная ширина щеткн $b_щ$, мм	8; 10	10; 12,5; 16,25	20; 25	25; 32

Используя значение ширины щетки $b_щ$, принятую по табл. 10.21, определяют требуемую длину щетки, мм,

$$l'_щ = S_{щ.б}/b_щ. \qquad (10.136)$$

Полученное значение округляют до стандартного значения $l_щ$, а затем определяют требуемое количество щеток на один бракет

$$N_{щ.б} = S_{щ.б}/b_щ\, l_щ. \qquad (10.137)$$

Полученное значение $N_{щ.б}$ округляют до ближайшего целого числа.

Затем определяют плотность тока под щеткой, А/мм²,

$$\Delta_щ = 2I_2/N_{щ.б}\, b_щ\, l_щ\, 2p, \qquad (10.138)$$

которая не должна превышать допустимого значения $\Delta'_щ$, принятого по табл. 2.2.

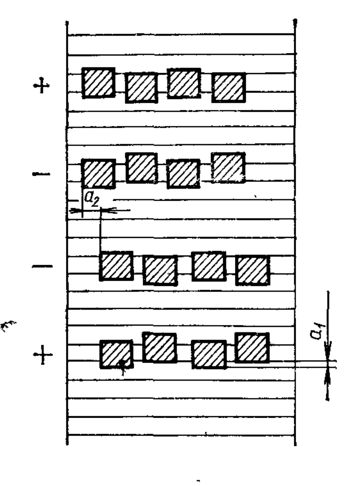


Рис. 10.29. Расположение щеток на коллекторе в шахматном порядке

Для равномерного износа поверхности коллектора щетки на бракетах располагают в шахматном порядке: щетки одной половины всех бракетов смещают вдоль коллектора относительно щеток другой половины бракетов на a_2, как это показано, например, на рис. 10.29.

Активная длина коллектора при шахматном расположении щеток, мм,

$$l_к = N_{щ.б}(l_щ + 8) + 10. \qquad (10.139)$$

Ширина коллекторной пластины, мм,

$$b_к = t_к - b_{из}, \qquad (10.140)$$

где $b_{из}$ — толщина изоляционных прокладок между коллекторными пластинами: при $h \leqslant 315$ мм $b_{из}=0{,}8$ мм; при $h > 315$ мм $b_{из}=1$.

10.12. РАСЧЕТ КОММУТАЦИИ

Задачей расчета коммутации является определение возможности работы машины при номинальной нагрузке со степенью искрения не более 1(1/2) по ГОСТ 183-74 (слабое точечное искрение под большей частью края щетки, при котором на коллекторе не остается неустраняемых следов нагара, а щетки остаются неповрежденными).

Интенсивность искрения на коллекторе, обусловленного коммутационными причинами, зависит от реактивной ЭДС, наводимой в коммутируемой секции, В,

$$E_р = 2w_{с2}\, l_i\, A_2\, v_2\, \lambda \cdot 10^{-5}, \qquad (10.141)$$

где $w_{с2}$ — число витков секции обмотки якоря; l_i — расчетная длина якоря, мм; A_2 — линейная нагрузка, А/м; $v_2 = \pi D_2 n \cdot 10^{-3}/60$ — окружная скорость якоря, м/с; λ — приведенный коэффициент магнитной проводимости коммутируемой секции.

Для машин с высотой оси вращения $h \leqslant 315$ мм коэффициент λ определяется следующими выражениями:

при овальных полузакрытых пазах на якоре (см. рис. 10.8, *а*)

$$\lambda = 0{,}6\,\frac{h_{z2}}{d_{п2}} + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} + \frac{l_{л2}}{l_2} + \frac{2{,}5\cdot 10^8}{w_{с2}\, l_2\, A_2 v_2}\,\frac{a_2}{p}; \qquad (10.142)$$

при прямоугольных открытых пазах на якоре (см. рис. 10.8, *б* и *в*)

$$\lambda = 0{,}6\,\frac{h_{z2}}{b_{п2}} + \frac{l_{л2}}{l_2} + \frac{2{,}5\cdot 10^8}{w_{с2}\, l_2\, A_2\, v_2}\,\frac{a_2}{p}. \qquad (10.143)$$

Для машин с высотой оси вращения $h = 355 \div 500$ мм, работающих при более напряженных условиях коммутации, коэффициент λ равен

$$\lambda = \frac{4u'}{2\gamma'}(\lambda_п + \lambda_z) + \lambda_л\,\frac{l_{л2}}{l_2}. \qquad (10.144)$$

В это выражение входят коэффициенты магнитных проводимостей рассеяния между стенками паза $\lambda_п$, коронками зубцов λ_z лобовых частей обмотки якоря $\lambda_л$. Для расчета этих коэффициентов пользуются выражениями

$$\lambda_п = 1{,}25\,\frac{h_{21}}{3b_{п2}} + \frac{h_{22}}{b_{п2}}, \qquad (10.145)$$

где h_{21}, h_{22} и $b_{п2}$ — из рис. 10.30;

$$\lambda_z = b_{z2max}/2\delta_д, \qquad (10.146)$$

где $\delta_д$ — воздушный зазор под добавочными полюсами, мм.

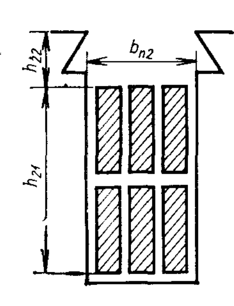


Рис. 10.30. Размеры открытого паза с обмоткой

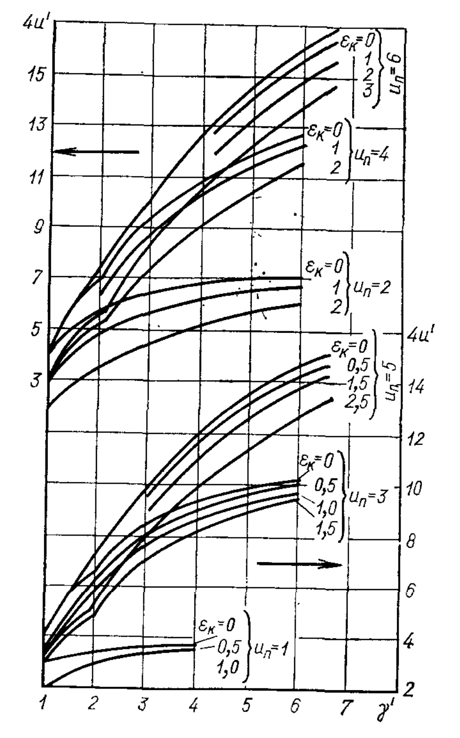


Рис. 10.31. Зависимости $4u' = f(\gamma';\ u_п;\ \varepsilon_к)$

Таблица 10.22

h, мм	Тип обмотки якоря	Предельные значения $E_р$, В
80—200	Петлевая (при $2p=2$) и волновая (при $2p=4$) с $w_{c2}>1$	2,5—3,5
225—315	Волновая	4—5
225—500	Петлевая и комбинированная	8—12

Коэффициент $\lambda_л$ равен 0,75 при бандаже обмотки якоря из магнитной проволоки и 0,5 при бандаже из стеклоленты или немагнитной проволоки.

Величина $4u'$, вошедшая в (10.144), представляет собой число одновременно коммутируемых секций. Значение этой величины определяют по рис. 10.31 в зависимости от $u_п$, $\varepsilon_к$ и относительной ширины щетки

$$\gamma' = (b_щ/t_к) + (1 + a_2/p). \qquad (10.147)$$

Для обеспечения удовлетворительной коммутации необходимо, чтобы реактивная ЭДС при наиболее неблагоприятных условиях работы машины (максимальная частота вращения якоря, перегрузка и т. п.) не превышала предельных значений (табл. 10.22).

Меньшие значения $E_р$ относятся к быстроходным машинам ($v_2>40$ м/с), а большие — к тихоходным.

10.13. ПОТЕРИ И КПД. ХАРАКТЕРИСТИКИ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Сумма потерь в машине постоянного тока, кВт,

$$\Sigma P = (P_{м2} + P_{э2} + P_{э,в} + P_{э,п1} + P_{э,щ} + P_{мех} + P_{доб})\cdot 10^{-3}, \qquad (10.148)$$

где $P_{м2}$ — магнитные потери в сердечнике якоря, Вт; $P_{э2}$ — электрические потери в обмотке якоря, Вт; $P_{э,в}$ — электрические потери в обмотке возбуждения, Вт; $P_{э,п1}$ — электрические потери в обмотках статора, включенных последовательно в цепь якоря (добавочных полюсов, стабилизирующей, компенсационной), Вт; $P_{э,щ}$ — электрические потери в переходном щеточном контакте, Вт; $P_{мех}$ — механические потери (потери на трение и вентиляцию), Вт; $P_{доб}$ — добавочные потери, Вт.

Магнитные потери в сердечнике якоря, Вт,

$$P_{м2} = 2{,}3P_{1,0/50}\,(f_2/50)^{\beta}\,(B_{z2}G_{z2} + B_{c2}G_{c2}), \qquad (10.149)$$

здесь B_{z2} и B_{c2} — магнитная индукция в зубцах и спинке якоря, Тл; G_{z2} — масса стали зубцов якоря, кг:

при овальных полузакрытых пазах (см. рис. 10.8, *а*)

$$G_{z2} = 7{,}8\cdot 10^{-6}\,Z_2\,b_{z2}\left(h_{п2} + \frac{d_{п2} + d'_{п2}}{4}\right) l_i\,k_{c2}; \qquad (10.150)$$

при прямоугольных открытых пазах (см. рис. 10.8, *б*)

$$G_{z2} = 7{,}8\cdot 10^{-6}\,Z_2\,b_{z2ср}\,h_{z2}\,l_i\,k_{c2}; \qquad (10.151)$$

G_{c2} — масса стали спинки якоря, кг:

при отсутствии аксиальных вентиляционных каналов

$$G_{c2} = 7{,}8\cdot 10^{-6}\,(\pi/4)\left[(D_2 - 2h_{z2})^2 - D_{2вн}^2\right] l_i\,k_{c2}; \qquad (10.152)$$

при наличии в якоре аксиальных вентиляционных каналов диаметром d_{k2} (мм)

$$G_{c2} = 7{,}8\cdot 10^{-6}\left\{(\pi/4)\left[(D_2 - 2h_{z2})^2 - D_{2вн}^2 - d_{к2}^2\,n_{к2}\right]\right\} l_i\,k_{c2}. \qquad (10.153)$$

Коэффициент 2,3 в (10.149) учитывает увеличение магнитных потерь, обусловленных технологическим процессом изготовления

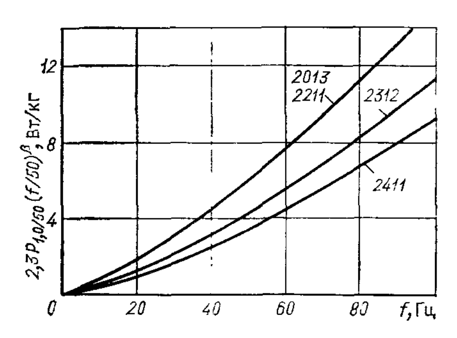


Рис. 10.32. Значения $2{,}3P_{1,0/50}(f_2/50) = f(f_2)$

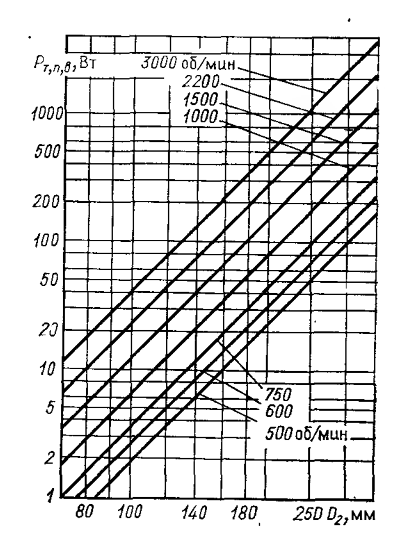


Рис. 10.33. Потери на трение в подшипниках качения и на вентиляцию →

сердечника якоря. Для упрощения расчетов при определении магнитных потерь в сердечнике якоря можно воспользоваться рис. 10.32.

Электрические потери в обмотке якоря, Вт,

$$P_{э2} = I_{2ном}^2\,r_2, \qquad (10.154)$$

где $I_{2ном}$ — уточненное значение тока в цепи якоря при номинальной нагрузке, А:

для двигателя

$$I_{2ном} = (U_{ном} - E_{2ном} - \Delta U_щ)/\Sigma r; \qquad (10.155)$$

для генератора

$$I_{2ном} = (E_{2ном} - U_{ном} - \Delta U_щ)/\Sigma r; \qquad (10.155а)$$

$\Delta U_щ$ — переходное падение напряжения в щетках, принимают по табл. 2.2 в соответствии с выбранной маркой щеток, В; Σr — сум-

ма сопротивлений обмоток, включенных в цепь якоря, при расчетной рабочей температуре, Ом:

$$\Sigma r = r_2 + r_c + r_д + r_к; \tag{10.156}$$

$E_{2ном}$ — ЭДС якоря при номинальной нагрузке, В:

$$E_{2ном} = \frac{pN_2}{60a_2}\Phi n_{ном}. \tag{10.157}$$

Электрические потери в обмотке главных полюсов при независимом или параллельном возбуждении, Вт,

$$P_{э,в} = U_в^2/r_в, \tag{10.158}$$

где $U_в$ — напряжение на выводах обмотки возбуждения, В.

Электрические потери в обмотках статора, включенных последовательно с обмоткой якоря, Вт,

$$P_{э,пl} = I_{2ном}^2(r_д + r_c + r_к), \tag{10.159}$$

где $r_д$ — сопротивление обмотки добавочных полюсов (10.104), Ом; r_c — сопротивление стабилизирующей обмотки (10.97), Ом; $r_к$ — сопротивление компенсационной обмотки (10.130), Ом.

Электрические потери в переходном щеточном контакте, Вт,

$$P_{э,щ} = \Delta U_щ I_{2ном}. \tag{10.160}$$

Механические потери, Вт,

$$P_{мех} = P_{т,щ} + P_{т,п,в}, \tag{10.161}$$

Здесь $P_{т,п,в}$ — потери на трение в подшипниках и на вентиляцию, определяют по рис. 10.33; $P_{т,щ}$ — потери на трение щеток о коллектор, Вт:

$$P_{т,щ} = 0{,}5\Sigma S_щ v_к, \tag{10.162}$$

где $S_щ$ — контактная площадь всех щеток (10.134), мм²; $v_к$ — окружная скорость коллектора (10.21), м/с.

Добавочные потери при номинальной нагрузке, Вт:

у некомпенсированных машин

$$P_{доб} = 0{,}01P_{ном}/\eta'_{ном}\cdot 10^{-3}; \tag{10.163}$$

у компенсированных машин

$$P_{доб} = 0{,}005P_{ном}/\eta'_{ном}\cdot 10^{-3}, \tag{10.164}$$

где $\eta'_{ном}$ — предварительное значение КПД машины при номинальной нагрузке (см. табл. 10.1 и рис. 10.2).

Добавочные потери при нагрузке, отличающейся от номинальной, Вт,

$$P'_{доб} = P_{доб}\beta^2; \tag{10.165}$$

здесь β — коэффициент нагрузки:

$$\beta = I_2/I_{2ном}; \tag{10.166}$$

I_2 — ток якоря при неноминальной нагрузке двигателя, А.

Коэффициент полезного действия машины постоянного тока: двигателя

$$\eta_д = 1 - \Sigma P/P_1, \tag{10.167}$$

где P_1 — потребляемая двигателем мощность, кВт;

генератора

$$\eta_г = P_2/(P_2 + \Sigma P), \tag{10.167а}$$

где P_2 — полезная мощность генератора, кВт:

$$P_2 = U_{ном}I\cdot 10^{-3}; \tag{10.167б}$$

здесь $I = I_2 - I_в$.

Для расчета рабочих характеристик двигателя следует задаться рядом значений коэффициента нагрузки β, например 0,2; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25, и для каждого из них рассчитать требуемые параметры двигателя: частоту вращения n, потребляемый ток I, потребляемую мощность P_1, суммарные потери ΣP, полезную мощность P_2, момент на валу M_2, КПД $\eta_д$.

Частота вращения двигателя параллельного (независимого) возбуждения, об/мин,

$$n = 60a_2 E_2/pN_2\Phi, \tag{10.168}$$

где

$$E_2 = U_{ном} - (I_2\Sigma r + \Delta U_щ). \tag{10.169}$$

Подводимая мощность, кВт,

$$P_1 = U_{ном}I_2 + P_{э,в}. \tag{10.170}$$

Потребляемый ток при параллельном возбуждении, А,

$$I = I_2 + U_{ном}/r_в. \tag{10.171}$$

Суммарные потери ΣP определяют по (10.148)—(10.165).

Момент на валу двигателя, Н·м,

$$M_2 = 9{,}55P_2\cdot 10^3/n; \tag{10.172}$$

здесь P_2 — полезная мощность двигателя, кВт:

$$P_2 = P_1 - \Sigma P. \tag{10.173}$$

Коэффициент полезного действия двигателя определяют по (10.167).

Результаты расчета заносят в таблицу, аналогичную табл. 10.24, а затем строят рабочие характеристики (см. рис. 10.43).

Свойства генератора постоянного тока определяют внешней характеристикой $U = f(I_2)$ при неизменной частоте вращения ($n = \text{const}$).

Для расчета этой характеристики следует задаться рядом значений коэффициента нагрузки β, например 0,2; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25, и для каждого из них определить напряжение на выводах генератора, В,

$$U = E_2 - (I_2\Sigma r + \Delta U_щ), \tag{10.174}$$

где

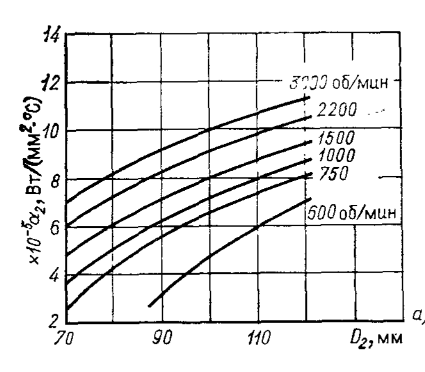
$$I_2 = \beta I_{2ном}; \qquad (10.175)$$

электродвижущая сила генератора, В,

$$E_2 = pN_2 \Phi n_{ном}/60a_2. \qquad (10.176)$$

10.14. УПРОЩЕННЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В основу упрощенного теплового расчета машин постоянного тока положены сведения, изложенные в § 3.4. В настоящем параграфе приведены уточняющие положения расчета применительно к машине постоянного тока.



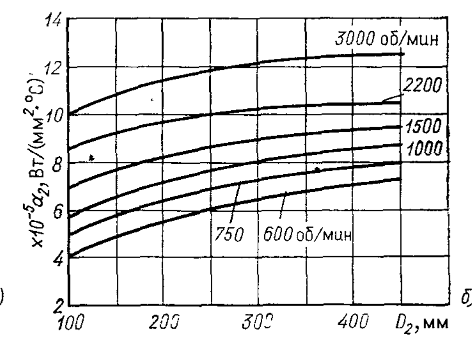


Рис. 10.34. Средние значения α_2:
а — при $2p=2$; *б* — при $2p=4$

Обмотка якоря. Превышение температуры поверхности сердечника якоря над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\Theta_{пов2} = \frac{P_{э2}(2l_2/l_{ср2}) + P_{м2}}{(\pi D_2 + n_{к2} d_{к2})\, l_2 \alpha_2}, \qquad (10.177)$$

где α_2 — коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника якоря, Вт/(мм²·°С), значения которого приведены на рис. 10.34.

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки якоря, °С,

$$\Delta\Theta_{из2} = \frac{P_{э2}(2l_2/l_{ср2})}{Z_2 \Pi_2 l_2}\left(\frac{d_{п2}+d'_{п2}}{16\lambda'_{экв}} + \frac{C_{в2}}{\lambda_{экв}}\right); \qquad (10.178)$$

здесь Π_2 — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза якоря, мм:

при овальных полузакрытых пазах

$$\Pi_2 = 0{,}5\pi\left(d_{п2}+d'_{п2}\right) + 2h_{п2}; \qquad (10.179)$$

при прямоугольных открытых пазах

$$\Pi_2 = 2\,(b_{п2} + h_{z2}); \qquad (10.180)$$

$\lambda'_{экв}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции обмотки из круглого провода (см. рис. 6.7), Вт/(мм²·°С); $\lambda_{экв}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности пазовой изоляции и изоляции лобовых частей с учетом воздушных промежутков, $\lambda_{экв} = 16\cdot10^{-5}$ Вт/(мм²·°С); C_{b2} — односторонняя толщина изоляции по ширине паза якоря, мм.

Для обмоток якоря из жестких секций первое слагаемое в скобках выражения (10.178) принимают равным нулю.

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки якоря над температурой воздуха внутри машины при отсутствии аксиальных вентиляционных каналов в якоре, °С,

$$\Delta\Theta_{л2} = \frac{P_{э2}(2l_{л2}/l_{ср2})}{2\pi D_2 l_{в2} \alpha_2}; \qquad (10.181)$$

при наличии в сердечнике якоря аксиальных каналов значение $\Delta\Theta_{л2}$, рассчитанное по (10.181), следует уменьшить в 2 раза.

Перепад температуры в изоляции лобовых частей обмотки якоря, °С,

$$\Delta\Theta_{из.л2} = \frac{P_{э2}(2l_{л2}/l_{ср2})}{2Z_2 \Pi_{л2} l_{л2}}\left(\frac{h_{z2}}{8\lambda'_{экв}} + \frac{C_{л2}}{\lambda_{экв}}\right), \qquad (10.182)$$

где $\Pi_{л2}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки якоря, мм:

для овальных полузакрытых пазов

$$\Pi_{л2} = 0{,}5\,(1+\pi/2)(d_{п2}+d'_{п2}) + h_{п2}; \qquad (10.183)$$

для прямоугольных открытых пазов

$$\Pi_{л2} \approx 2\,(b_{п2}+h_{z2}); \qquad (10.184)$$

$C_{л2}$ — односторонняя толщина изоляции лобовой части обмотки якоря.

Для обмоток якоря из жестких секций первое слагаемое в скобках выражения (10.182) принимают равным нулю.

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\Theta'_2 = \frac{2l_2}{l_{ср2}}(\Delta\Theta_{пов2} + \Delta\Theta_{из2}) + \frac{2l_{л2}}{l_{ср2}}(\Delta\Theta_{л2} + \Delta\Theta_{из.л2}). \qquad (10.185)$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\Theta_в = \Sigma P'/S_м \alpha_в, \qquad (10.186)$$

где $\Sigma P'$ — сумма всех потерь, за исключением доли потерь в обмотках главных и добавочных полюсов, а также пазовой части компенсационной обмотки, передаваемая через наружную поверхность станины непосредственно в окружающую среду машины, Вт.

Для машин защищенного исполнения IP22

$$\Sigma P' = \Sigma P - 0{,}1\,(P_{э.в} + P_{э.пI}). \qquad (10.187)$$

Условная поверхность охлаждения машины, мм²,

$$S_{м} = \pi D_1 (l_2 + 2l_{в2}). \tag{10.188}$$

Среднее значение коэффициента $\alpha_{в}$, учитывающего подогрев воздуха, определяют по рис. 10.35.

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\Theta_2 = \Delta\Theta_2' + \Delta\Theta_{в}. \tag{10.189}$$

Обмотка возбуждения. Превышение температуры наружной поверхности охлаждения многослойной катушки над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\Theta_{к,в} = 0{,}9P_{э,в}/2pS_{к,в}\,\alpha_1. \tag{10.190}$$

Условная поверхность охлаждения, мм²,

$$S_{к,в} = l_{ср,к}\,\Pi_{к,в}, \tag{10.191}$$

где $\Pi_{к,в}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушки, мм. При определении $\Pi_{к,в}$ следует воспользо-

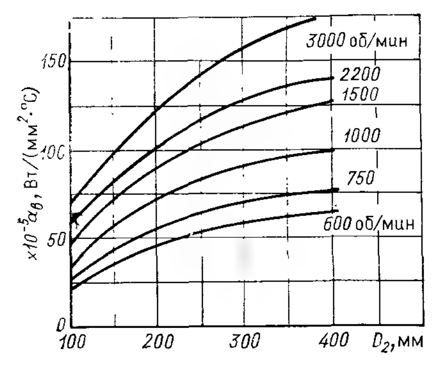


Рис. 10.35. Средние значения $\alpha_{в}$

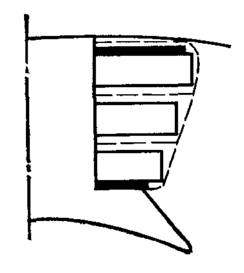


Рис. 10.36. Поверхность охлаждения полюсной катушки обмотки возбуждения

ваться эскизом межполюсного окна, выполненным в масштабе (рис. 10.36). При этом поверхность катушки, прилегающая к сердечнику полюса, не учитывается; поверхность, прилегающая к изоляционным рамкам, учитывается с коэффициентом 0,3; поверхность в аксиальных каналах секционированных катушек учитывается с коэффициентом 0,5; наружная поверхность катушки учитывается полностью. Средние значения периметра катушки возбуждения представлены на рис. 10.37.

Коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности охлаждения катушки возбуждения α_1 определяют по рис. 10.38.

Перепад температуры в изоляции катушки, °С,

$$\Delta\Theta_{из,к,в} = 0{,}9\,\frac{P_{э,в}}{2pS_{к,в}}\left(\frac{b_{к,ш}}{8\lambda'_{экв}} + \frac{b_{из,ш}}{\lambda_{экв}}\right), \tag{10.192}$$

где $b_{к,ш}$ и $b_{из,ш}$ — ширина катушки и односторонняя толщина наружной изоляции катушки, мм.

Для катушек без наружной изоляции $b_{из,ш}=0$. Для катушек из провода прямоугольного сечения первое слагаемое в скобках равно нулю. При круглых обмоточных проводах и пропитке катушек лаком $\lambda'_{экв}$ принимают по рис. 6.7, если же катушки компаундированы, то $\lambda'_{экв}$, принятое по рис. 6.7, увеличивают в 2 раза. Коэффициент $\lambda_{экв} = 16\cdot10^{-5}$ Вт/(мм²·°С).

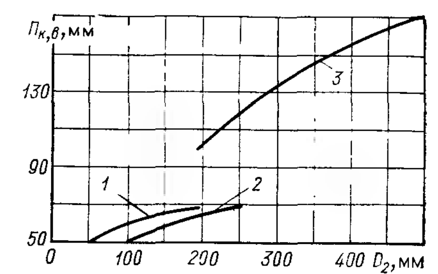


Рис. 10.37. Средние значения $\Pi_{к,в}$:

1 — сплошные катушки при $2p=2$; *2* — то же, при $2p=4$; *3* — секционированные катушки при $2p=4$

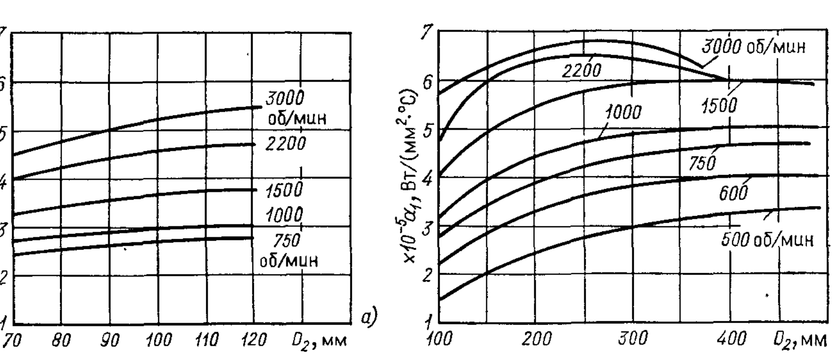


Рис. 10.38. Средние значения α_1:

а — при $2p=2$; *б* — при $2p=4$

Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\Theta'_{к,в} = \Delta\Theta_{к,в} + \Delta\Theta_{из,к,в}. \tag{10.193}$$

Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\Theta_{о,в} = \Delta\Theta'_{к,в} + \Delta\Theta_{в}, \tag{10.194}$$

где $\Delta\Theta_{в}$ определяют по (10.186).

Если плотность тока в стабилизирующей обмотке не превышает плотности тока в обмотке добавочных полюсов, то тепловой расчет стабилизирующей обмотки можно не проводить.

Обмотка добавочных полюсов. Превышение температуры наружной поверхности катушки добавочного полюса над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\Theta_{к,д} = 0{,}9P_{э,д}/2p_{д}\,S_{д}\,\alpha_1', \tag{10.195}$$

где $P_{э,д} = I_2^2 r_д$ — электрические потери в обмотке добавочных полюсов, Вт; $S_д$ — условная поверхность охлаждения катушки добавочного полюса, мм².

Для многослойных катушек из изолированного провода

$$S_д = l_{ср,д} П_{к,д}, \qquad (10.196)$$

где $П_{к,д}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения полюсной катушки, мм.

Указания к определению $П_{к,в}$ относятся и к определению $П_{к,д}$ (см. рис. 10.36). Средние значения $П_{к,д}$ приведены на рис. 10.39:

$$S_д = l_{ср,д} (w_{к,д} a + 0{,}6b), \qquad (10.197)$$

где a и b — высота и ширина шины, мм.

Средние значения коэффициента теплоотдачи α_1' для машин со степенью защиты IP22 приведены на рис. 10.40.

Перепад температуры в изоляции многослойных катушек добавочных полюсов, °С,

$$\Delta\Theta_{из,к,д} = 0{,}9 \frac{P_{э,д}}{2p_д S_д}\left(\frac{b_{к,д}}{8\lambda'_{экв}} + \frac{b_{из,д}}{\lambda_{экв}}\right), \qquad (10.198)$$

где $b_{к,д}$ — ширина катушки добавочного полюса, мм; $b_{из,д} = 0{,}2$ мм — односторонняя толщина дополнительной изоляции катушки добавочного полюса; при отсутствии такой изоляции $b_{из,д} = 0$; $\lambda'_{экв}$ и $\lambda_{экв}$ определяют так же, как и для обмотки возбуждения; для катушек из провода прямоугольного сечения первое слагаемое в скобках равно нулю.

Среднее превышение температуры обмотки добавочных полюсов над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\Theta'_{к,д} = \Delta\Theta_{к,д} + \Delta\Theta_{из,к,д}. \qquad (10.199)$$

Среднее превышение температуры обмотки добавочных полюсов над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\Theta_д = \Delta\Theta'_{к,д} + \Delta\Theta_в, \qquad (10.200)$$

где $\Delta\Theta_в$ определяют по (10.186).

Компенсационная обмотка (стержневая). Превышение температуры поверхности полюсного наконечника главного полюса над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\Theta_{п1} = 0{,}9 (P_{э,ст} + P_{м,п})/S_п \alpha_1', \qquad (10.201)$$

где $P_{э,ст}$ — электрические потери в стержнях компенсационной обмотки, Вт:

$$P_{э,ст} = I_2^2 2p\rho_{Cu} N_1 l_{ст1} \cdot 10^{-3}/a_к^2 q_1; \qquad (10.202)$$

$P_{м,п}$ — добавочные магнитные потери в полюсных наконечниках, обусловленные пульсацией магнитной индукции, Вт:

$$P_{м,п} = k_{п,н} [k_{\delta 1} - 1) B_\delta t_1]^2 \left(\frac{Z_2 n}{10^4}\right)^{1,5} \frac{2pb_{mн} l_m}{10^6}. \qquad (10.203)$$

Коэффициент $k_{п,н}$ принимают в зависимости от толщины листов главного полюса:

Толщина листов, мм	0,5	1,0	1,5	2,0
$k_{п,н}$	1,5	2,8	4,0	5,2

В (10.203) $b_{m,н}$ — длина дуги полюсного наконечника, мм; l_m — длина главного полюса, мм.

Условная поверхность охлаждения полюсных наконечников главных полюсов, мм²,

$$S_п = 2pb_{mн} l_m. \qquad (10.204)$$

Перепад температуры в изоляции стержней, °С,

$$\Delta\Theta_{из1} = 0{,}9 \frac{P_{э,ст1}}{S_{ст1}} \frac{b_{из1}}{\lambda_{экв}}, \qquad (10.205)$$

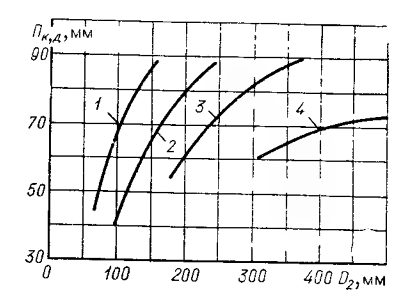


Рис. 10.39. Средние значения $П_{к,д}$:

1 — многослойные катушки при $2p=2$; *2* — то же при $2p=4$; *3* — однослойные катушки из голой неизолированной меди для некомпенсированных машин при $2p=4$; *4* — то же для компенсированных машин

Рис. 10.40. Средние значения α_1'

где $b_{из1}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу главного полюса, мм:

$$b_{из1} = (b_{п1} - u_п b_{пр})/2; \qquad (10.206)$$

$S_{ст1}$ — условная поверхность охлаждения стержней в пазах, мм²:

$$S_{ст1} = 2pZ_1 П_1 l_m; \qquad (10.207)$$

$П_1$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза, мм:

$$П_1 = 2(b_{п1} + h_{z1}). \qquad (10.208)$$

Среднее превышение температуры поверхности соединительных дуг компенсационной обмотки над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\Theta_{д,к} = P_{э,д,к}/S_{д,к} \alpha_1', \qquad (10.209)$$

где $P_{э,д.к}$ — электрические потери в соединительных дугах компенсационной обмотки, Вт:

$$P_{э,д.к} = I_2^2 2p\rho_{Cu} N_1 l_{ср,д} \cdot 10^{-3}/a_к^2 q_{1д}; \qquad (10.210)$$

$S_{д,к}$ — условная поверхность охлаждения дуг компенсационной обмотки, мм²:

$$S_{д,к} = 2pN_1 l_{ср,д} (b_{д1} + h_{д1}). \qquad (10.211)$$

Среднее превышение температуры компенсационной обмотки над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\Theta_к' = \frac{(\Delta\Theta_{п1} + \Delta\Theta_{из1}) l_{ст1} + \Delta\Theta_{д\cdot к} l_{ср,д}}{l_{ст1} + l_{ср,д}}. \qquad (10.212)$$

Среднее превышение температуры компенсационной обмотки над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\Theta_к = \Delta\Theta_к' + \Delta\Theta_в. \qquad (10.213)$$

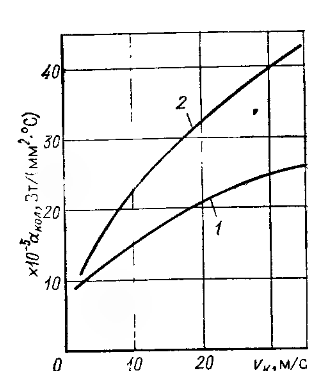


Рис. 10.41. Средние значения $\alpha_{кол}$

Коллектор. Превышение температуры наружной поверхности коллектора над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\Theta_{кол}' = (P_{э,щ} + P_{т,щ})/S_{кол}\,\alpha_{кол}, \qquad (10.214)$$

где $S_{кол}$ — условная поверхность охлаждения коллектора, мм²:

$$S_{кол} = \pi D_к l_к; \qquad (10.215)$$

$\alpha_{кол}$ — коэффициент теплоотдачи наружной поверхности коллектора (рис. 10.41).

Превышение температуры коллектора над температурой охлаждающей среды (°С) для машин защищенного исполнения (IP22) со способом охлаждения IC01:

при входе охлаждающего воздуха со стороны коллектора

$$\Delta\Theta_{кол} = \Delta\Theta_{кол}'; \qquad (10.216)$$

при входе охлаждающего воздуха со стороны, противоположной коллектору,

$$\Delta\Theta_{кол} = \Delta\Theta_{кол}' + 2\Delta\Theta_в. \qquad (10.217)$$

10.15. ПРИМЕР РАСЧЕТА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Задание. Рассчитать двигатель постоянного тока на базе серии 2П.

Исходные данные:

номинальная мощность $P_{ном}$=75 кВт;

номинальное напряжение сети $U_{ном}$=220 В;

номинальная частота вращения $n_{ном}$=1500 об/мин;

высота оси вращения h=250 мм;

степень защиты IP22;

способ охлаждения IC01;

способ возбуждения — параллельное с последовательной стабилизирующей обмоткой;

максимальная частота вращения n_{max}=2200 об/мин;

класс нагревостойкости изоляции F;

режим работы — продолжительный.

1. Главные размеры двигателя

1.1. Предварительное значение КПД при номинальной нагрузке (табл. 10.1)

$$\eta_{ном}' = 0{,}89.$$

1.2. Расчетная мощность двигателя (10.2)

$$P_i = k_д P_{ном} = 1{,}07 \cdot 75 = 80{,}25 \text{ кВт},$$

где $k_д$=1,07.

1.3. Наружный диаметр якоря и число главных полюсов (табл. 10.2) D_2=258 мм; $2p$=4.

1.4. Предварительное значение коэффициента полюсного перекрытия по (рис. 10.3) при $2p$=4 и D_2=258 мм α_i'=0,65.

1.5. Предварительное значение максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре (рис. 10.4) B_δ'=0,77 Тл.

1.6. Предварительное значение линейной нагрузки (рис. 10.5) A_2'=380·10² А/м.

1.7. Расчетная длина сердечника якоря (4.14)

$$l_i = \frac{6{,}1 \cdot 10^{12} P_i}{k_в' k_{об}' \alpha_i' n_{ном} D_2^2 B_\delta' A_2'} = \frac{6{,}1 \cdot 10^{12} \cdot 80{,}25}{1 \cdot 1 \cdot 0{,}65 \cdot 1500 \cdot 258^2 \cdot 0{,}77 \cdot 380 \cdot 10^2} = 258 \text{ мм}.$$

1.8. Коэффициент длины сердечника якоря (10.3) $\lambda = l_i/D_2$=258/258=1,00, что находится в пределах рекомендуемых значений (рис. 10.6.).

1.9. Внутренний диаметр сердечника якоря (10.4)

$$D_{2вн} = 0{,}31 D_2 = 0{,}31 \cdot 258 = 80 \text{ мм}.$$

2. Дополнительные размеры

2.1. В соответствии с табл. 10.4 принимаем: марка электротехнической стали сердечника якоря — 2312; форма пазов на якоре — прямоугольные открытые (см. рис. 10.8, *б*); тип обмотки якоря — из жестких катушек.

2.2. В соответствии с табл. 10.5 предусматриваем в сердечнике якоря аксиальные вентиляционные каналы в один ряд, число каналов $n_{к2}$=18, диаметр одного канала $d_{к2}$=18 мм.

2.3. Конструктивная длина сердечника якоря $l_2 = l_i$=258 мм.

2.4. Воздушный зазор эксцентричный. По рис. 10.9 принимаем δ=2,0 мм, тогда δ_{min}=2,0/1,5=1,33 мм; δ_{max}=2,0·2=4,0 мм.

2.5. Длина сердечника главного полюса $l_m = l_2$=258 мм.

2.6. Предварительное значение высоты главного полюса (рис. 10.11) h_m=80 мм.

2.7. Полюсное деление (10.7)

$$\tau = \pi D_2/2p = \pi \cdot 258/4 = 202 \text{ мм}.$$

2.8. Магнитная индукция в сердечнике главного полюса B_m=1,65 Тл.

2.9. Ширина сердечника главного полюса (10.6)

$$b_m = \frac{B'_\delta \alpha'_i \tau \sigma'}{k_{c1} B_m} = \frac{0,77 \cdot 0,65 \cdot 202 \cdot 1,2}{0,95 \cdot 1,65} = 77 \text{ мм}.$$

2. 10. Ширина выступа полюсного наконечника главного полюса (рис. 10.10)

$$b_{m\text{н}} = 0,10 b_m = 0,10 \cdot 77 \approx 8 \text{ мм}.$$

2.11. Высота полюсного наконечника в основании выступа (10.8)

$$h_{m\text{н}} = \frac{B'_\delta}{1,67 B_m}(b_p - b_m) = \frac{0,77}{1,67 \cdot 1,65}(131 - 77) = 15 \text{ мм},$$

где длина полюсного наконечника (10.9)

$$b_p = \alpha'_i \tau = 0,65 \cdot 202 = 131 \text{ мм}.$$

2.12. Сердечники главных и добавочных полюсов изготавливаем из электротехнической стали марки 3411 толщиной 1 мм ($k_c = 0,98$).

2.13. Длина сердечника добавочного полюса $l_\text{д} = l_2 = 258$ мм.

2.14. Ширина сердечника добавочного полюса (рис. 10.13) $b_\text{д} = 30$ мм.

Число добавочных полюсов $2p_\text{д} = 4$.

2.15. Воздушный зазор между якорем и добавочным полюсом (рис. 10.14) $\delta_\text{д} = 5$ мм.

2.16. Длина станины (10.10, *а*)

$$l_{c1} = l_2 + k_l \tau = 258 + 0,65 \cdot 202 = 400 \text{ мм},$$

где $k_l = 0,65$. Материал станины — сталь марки Ст3.

2.17. Толщина станины (10.10)

$$h_{c1} = \frac{B'_\delta \alpha'_i \tau \sigma' l_2}{2 B_{c1} l_{c1}} = \frac{0,77 \cdot 0,65 \cdot 202 \cdot 1,2 \cdot 258}{2 \cdot 1,28 \cdot 400} \approx 32 \text{ мм},$$

где $B_{c1} = 1,28$ Тл.

2.18. Внутренний диаметр станины (10.11)

$$D_{1\text{вн}} = D_2 + 2\delta_\text{мин} + 2h_m + 2\delta = 258 + 2 \cdot 1,33 + 2 \cdot 80 + 2 \cdot 2 = 425 \text{ мм}.$$

2.19. Наружный диаметр станины

$$D_1 = D_{1\text{вн}} + 2h_{c1} = 425 + 2 \cdot 32 = 489 \text{ мм}.$$

3. Обмотка якоря

3.1. Номинальный ток якоря (10.16)

$$I_{2\text{ном}} = \frac{P_\text{ном} \cdot 10^3}{\eta'_\text{ном} U_\text{ном}}(1 - k_i) = \frac{75 \cdot 10^3}{0,89 \cdot 220}(1 - 0,02) = 375 \text{ А}.$$

Так как $I_{2\text{ном}} < 700$ А, то в соответствии с табл. 10.6 принимаем простую волновую обмотку якоря $2a_2 = 2$.

3.2. Принимаем зубцовое деление $t_2 = 30$ мм.

3.3. Число пазов якоря (10.18)

$$Z_2 = \pi D_2 / t_2 = \pi \cdot 258/30 = 27 \text{ пазов},$$

что удовлетворяет требованиям табл. 10.7.

3.4. Число эффективных проводников в обмотке якоря (10.17)

$$N_2 = A'_2 \pi D_2 \cdot 2a_2 / I'_{2\text{ном}} \cdot 10^3 = 380 \cdot 10^2 \pi \cdot 258 \cdot 2/375 \cdot 10^3 = 164.$$

Таблица 10.23

№ варианта	$u_\text{п}$	$K = u_\text{п} Z_2$	$D_\text{к}$, мм	$t_\text{к}$, мм	$w_{c2} = \frac{N_2}{2K}$	$U_\text{к}$, В
1	1	27	180	20,9	3	32,6
2	2	54	180	10,5	1,5	16,3
3	3	81	180	7,0	1	10,9

Принимаем $N_2 = 162$, тогда

$$N_2 / Z_2 = 162/27 = 6.$$

3.5. Диаметр коллектора (10.20) $D_\text{к} = 0,70 D_2 = 0,7 \cdot 258 = 180$ мм, что соответствует стандартному значению $D_\text{к}$.

Максимальная окружная скорость на коллекторе (10.21) $v_{max} = \pi D_\text{к} n_{max} / 60 \cdot 10^3 = \pi 180 \cdot 2200/60 \cdot 10^3 = 20,7$, м/с, что не превышает допускаемого значения 40 м/с.

3.6. Составляем таблицу вариантов (табл. 10.23).

Так как напряжение $U_\text{к}$ не должно превышать 16 В, принимаем вариант № 3, т. е. $u_\text{п} = 3$; $K = Z_\text{э} = 81$; $t_\text{к} = 7,0$ мм; $w_{c2} = 1$; $U_\text{к} = 10,9$ В.

3.7. Шаг обмотки якоря:

первый частичный шаг по якорю (10.14)

$$y_1 = (Z_\text{э}/2p) \mp \varepsilon = (81/4) - 0,25 = 20;$$

шаг обмотки по коллектору (10.14а)

$$y_\text{к} = (K \mp 1)/p = (81 - 1)/2 = 40;$$

шаг обмотки по реальным пазам (10.12)

$$y_z = (Z_2/2p) \mp \varepsilon = (27/4) + 0,25 = 7.$$

3.8. Уточненное значение линейной нагрузки (10.24)

$$A_2 = \frac{N_2 I_{2\text{ном}}}{2a_2 \pi D_2 \cdot 10^{-3}} = \frac{162 \cdot 375}{2 \cdot \pi 258 \cdot 10^{-3}} = 375 \cdot 10^2 \text{ А/м},$$

где $N_2 = 2u_\text{п} Z_2 w_{c2} = 2 \cdot 3 \cdot 27 \cdot 1 = 162$.

4. Пазы якоря прямоугольные, открытые по рис. 10.8, б

4.1. Частота перемагничивания якоря (10.26)

$$f_2 = p n_\text{ном}/60 = 2 \cdot 1500/60 = 50 \text{ Гц}.$$

4.2. Ширина зубца якоря в его основании (10.46)

$$b_{z2min} = t_2 B'_\delta / k_{c2} B_{z2max} = 30 \cdot 0,77/0,95 \cdot 2,3 = 10,6 \text{ мм},$$

где $B_{z2max} = 2,3$ Тл.

4.3. Высота зубца якоря (рис. 10.16)

$$h_{z2} = 32 \text{ мм}.$$

4.4. Высота спинки якоря (10.29)

$$h_{c2} = \frac{D_2 - D_{2\text{вн}}}{2} - h_{z2} = \frac{(258 - 80)}{2} - 32 = 57 \text{ мм}.$$

4.5. Магнитная индукция в спинке якоря (10.28)

$$B_{c2}=\frac{B_\delta' \alpha_i' \tau}{2k_{c2}\left(h_{c2}-\frac{2}{3}d_{к2}\right)}=\frac{0,77\cdot 0,65\cdot 202}{2\cdot 0,95\left(57-\frac{2}{3}18\right)}=1,18\ \text{Тл},$$

что не превышает допустимого значения $B_{c2}=1,4$ Тл.

4.6. Ширина паза (10.47)

$$b_{п2}=\frac{\pi(D_2-2h_{z2})}{Z_2}-b_{z2min}=\frac{\pi(258-2\cdot 32)}{27}-10,6=11,96\ \text{мм}.$$

4.7. Высота бандажных канавок $h_б=3$ мм.

4.8. Толщина изоляции по высоте и ширине паза якоря при $w_{c2}=1$ и $u_п=3$ (табл. 10.11) $C_{h2}=4,8$ мм, $C_{b2}=1,7$ мм.

4.9. Допустимая высота прямоугольного провода с витковой изоляцией (10.48)

$$b_{из}'=\frac{(h_{z2}-C_h-h_б-h_{пр})}{N_h}=\frac{(32-4,8-3-0,3)}{4}=5,97\ \text{мм}.$$

В целях ограничения эффекта вытеснения тока в проводах обмотки якоря разделяем эффективный провод по высоте на два, т. е. принимаем количество проводов по высоте паза $N_h=4$.

4.10. Допустимая ширина прямоугольного провода с витковой изоляцией (10.49)

$$a_{из}'=(b_{п2}-C_{в2}-b_{пр}-b_{ск})/u_п=(11,96-1,7-0,3-0,1)/3=3,28\ \text{мм}.$$

4.11. Принимаем обмоточный провод марки ПЭТП-155; допустимая высота и ширина голого провода (10.51) и (10.52)

$$b'=b_{из}'-0,15=5,97-0,15=5,82\ \text{мм};$$

$$a'=a_{из}'-0,15=3,28-0,15=3,13\ \text{мм}.$$

Принимаем стандартный провод прямоугольного сечения по табл. П.1.2 с размерами без изоляции $a\times b=3,0\times 5,6$ мм $q_{2эл}=16,25$ мм²; размеры провода с изоляцией $a_{из}\times b_{из}=3,15\times 5,75$ мм.

4.12. Уточненные размеры паза:

по высоте (10.53)

$$h_{z2}=N_h b_{из}+C_{h2}+h_б+h_{пр}=4\cdot 5,75+4,8+3+0,3=31,1\ \text{мм};$$

по ширине (10.54)

$$b_{п2}=u_п a_{из}+C_{в2}+b_{пр}+b_{ск}=3\cdot 3,15+1,7+0,3+0,1=11,6\ \text{мм}.$$

Уточненное значение высоты спинки статора $h_{c2}=57,9$ мм.

4.13. Допустимая плотность тока в обмотке якоря (10.39)

$$\Delta_{доп}=(A_2\Delta_{доп})\cdot 10^{-6}/A_2=2,25\cdot 10^{11}\cdot 10^{-6}/(375\cdot 10^2)=6\ \text{А/мм}^2;$$

по рис. 10.17 при $D_2=258$ мм принимаем $A_2\Delta_{доп}=2,25\cdot 10^{11}$ А²/м³.

4.14. Плотность тока в обмотке якоря (10.38)

$$\Delta_2=I_{2ном}/2a_2 n_{эл} q_{2эл}=375/2\cdot 2\cdot 16,25=5,77\ \text{А/мм}^2,$$

что не превышает допустимое значение плотности тока.

Конструкция изоляции пазовых и лобовых частей обмотки якоря при напряжении, не превышающем 600 В, приведена в табл. 10.11.

5. Размеры секции и сопротивление обмотки якоря

5.1. Среднее значение зубцового деления якоря (10.41)

$$t_{ср2}=\pi(D_2-h_{z2})/Z_2=\pi(258-31,1)/27=26,3\ \text{мм}.$$

5.2 Средняя ширина секции обмотки якоря (10.40)

$$b_{с,ср}=t_{ср2}\,y_z=26,3\cdot 7=184\ \text{мм}.$$

5.3. Средняя длина одной лобовой части обмотки (10.55)

$$b_{л2}=\frac{b_{с,ср}}{\sqrt{1-[(b_{п2}+3,5)/t_2]^2}}+h_{z2}+40=$$

$$=\frac{184}{\sqrt{1-[(11,6+3,5)/30]^2}}+32+40=288\ \text{мм}.$$

5.4. Средняя длина витка обмотки (10.43)

$$l_{ср2}=2(l_2+l_{л2})=2(258+288)=1092\ \text{мм}.$$

5.5. Вылет лобовой части обмотки якоря (10.56)

$$l_{в2}=\frac{b_{с,ср}}{2}\frac{(b_{п2}+3,5)/t_2}{\sqrt{1+[(b_{п2}+3,5)/t_2]^2}}+\frac{h_{z2}}{2}+20=$$

$$=\frac{184}{2}\frac{(11,6+3,5)/30}{\sqrt{1+[(11,6+3,5)/30]^2}}+\frac{32}{2}+20=91\ \text{мм}.$$

5.6. Активное сопротивление обмотки якоря (10.45)

$$r_2=\frac{\rho_{Cu}N_2 l_{ср2}\cdot 10^3}{2(2a)^2 n_{эл} q_{2эл}}=\frac{24,4\cdot 10^{-9}\cdot 162\cdot 1092\cdot 10^3}{2\cdot 2^2\cdot 2\cdot 16,25}=0,0166\ \text{Ом}.$$

6. Расчет магнитной цепи

6.1. Предварительное значение ЭДС двигателя при номинальной нагрузке (10.60)

$$E_{2ном}'=0,5U_{ном}\left(1+\eta_{ном}'\right)=0,5\cdot 220(1+0,89)=208\ \text{В}.$$

6.2. Полезный магнитный поток (10.58)

$$\Phi=\frac{60a_2E_{2ном}}{pN_2 n_{ном}}=\frac{60\cdot 1\cdot 208}{2\cdot 162\cdot 1500}=0,0256\ \text{Вб}.$$

6.3. Уточненное значение магнитной индукции в воздушном зазоре (10.62)

$$B_\delta=\frac{\Phi\cdot 10^6}{\alpha_i'\tau l_i}=\frac{0,0256\cdot 10^6}{0,65\cdot 202\cdot 258}=0,755\ \text{Тл}.$$

6.4. Коэффициент воздушного зазора (10.63)

$$k_\delta=k_{\delta2}\cdot k_б=1,27\cdot 1,17=1,48;$$

$$k_{\delta2}=1+\frac{b_{п2}}{t_2-b_{п2}+5\delta t_2/b_{п2}}=1+\frac{11,6}{30-12+5\cdot 2,0\cdot 30/12}=1,27;$$

$$k_б=1+\frac{n_б l_б h_б}{l_2(\delta+h_б)-n_б l_б h_б}=1+\frac{0,25\cdot 258\cdot 3}{258(2,0+3)-0,25\cdot 258\cdot 3}=1,17,$$

где $n_b l_b=0,25l_2$; $h_б=3$ мм.

6.5. Магнитное напряжение воздушного зазора (10.61)

$$F_\delta = 0{,}8B_\delta\,\delta k_\delta \cdot 10^3 = 0{,}8\cdot 0{,}755\cdot 2{,}0\cdot 1{,}48\cdot 10^3 = 1787 \text{ А}.$$

6.6. Магнитная индукция в наименьшем сечении зубца (5.183)

$$B_{zmax} = B_\delta\, t_2/k_{c2}\, b_{z2min} = 0{,}755\cdot 30/0{,}95\cdot 10{,}6 = 2{,}24 \text{ Тл},$$

где b_{z2min}=10,6 мм (см. п. 4.2).

6.7. Ширина зубца в его наибольшем расчетном сечении (5.160)

$$b_{z2max} = t_2 - b_{п2} = 30 - 11{,}6 = 18{,}4 \text{ мм}.$$

6.8. Ширина зубца в его среднем расчетном сечении (5.161)

$$b_{z2ср} = 0{,}5\,(b_{z2min} + b_{z2max}) = 0{,}5\,(10{,}6 + 18{,}4) = 14{,}5 \text{ мм}.$$

6.9. Магнитная индукция в расчетных сечениях зубца:

в наименьшем

$$B_{z2max} = 2{,}24 \text{ Тл};$$

в наибольшем (5.163)

$$B_{z2min} = B_\delta\, t_2/k_{c2}\, b_{z2max} = 0{,}755\cdot 30/0{,}95\cdot 18 = 1{,}32 \text{ Тл};$$

в среднем

$$B_{z2ср} = B_\delta\, t_2/k_{c2}\, b_{z2ср} = 0{,}755\cdot 30/0{,}95\cdot 14{,}5 = 1{,}64 \text{ Тл}.$$

6.10. Коэффициент для определения напряженности магнитного поля в наименьшем сечении зубца (5.165)

$$k_{п2max} = t_2/k_{c2}\, b_{z2min} = 30/0{,}95\cdot 10{,}6 = 2{,}98.$$

6.11. Напряженность поля при B_{z2max}=2,24 Тл (рис. П.2.4) для стали марки 2312 $H_{z2max}=8\cdot 10^4$ А/м.

6.12. Напряженность поля при B_{z2min}=1,32 Тл и $B_{z2ср}$=1,64 Тл (табл. П.2.4) H_{z2min}=610 А/м; $H_{z2ср}$=4400 А/м.

6.13. Расчетное значение напряженности поля в зубце (5.168)

$$H_{z2} = (H_{z2max} + 4H_{z2ср} + H_{z2min})/6 = (80 + 4\cdot 4{,}4 + 0{,}61)\cdot 10^3/6 = 16{,}36\cdot 10^3 \text{ А/м}.$$

6.14. Магнитное напряжение зубцового слоя якоря (5.186)

$$F_{z2} = H_{z2}\, h_{z2}\cdot 10^{-3} = 16{,}36\cdot 10^3\cdot 31{,}1\cdot 10^{-3} = 509 \text{ А}.$$

6.15. Магнитная индукция в спинке якоря (10.29)

$$B_{c2} = \frac{B_\delta\, \alpha_i\, \tau}{2k_{c2}\left(h_{c2} - \frac{2}{3}\, d_{к2}\right)} = \frac{0{,}755\cdot 0{,}65\cdot 202}{2\cdot 0{,}95\left(57{,}9 - \frac{2}{3}\, 18\right)} = 1{,}13 \text{ Тл}.$$

6.16. Расчетная длина магнитной силовой линии в спинке якоря (10.70)

$$L_{c2} = (\pi/2p)\,(D_{2вн} + h_{c2}) + h_{c2} = (\pi/4)\,(80 + 57{,}9) + 57{,}9 = 166 \text{ мм}.$$

6.17. Напряженность поля в спинке якоря (табл. П.2.4) H_{c2}=330 А/м.

6.18. Магнитное напряжение спинки якоря (10.69)

$$F_{c2} = H_{c2}\, L_{c2}\cdot 10^{-3} = 330\cdot 166\cdot 10^{-3} = 55 \text{ А}.$$

6.19. Магнитная индукция в сердечнике главного полюса (10.75)

$$B_m = \frac{\sigma_г\, \Phi\cdot 10^6}{l_m\, k_{c1}\, b_m} = \frac{1{,}2\cdot 0{,}0256\cdot 10^6}{258\cdot 0{,}98\cdot 77} = 1{,}57 \text{ Тл}.$$

6.20. Напряженность поля в сердечнике главного полюса (табл. П.2.10) H_m=910 А/м.

6.21. Магнитное напряжение сердечника главного полюса (10.74)

$$F_m = H_m\, L_m\cdot 10^{-3} = 910\cdot 80\cdot 10^{-3} = 73 \text{ А},$$

где $L_m = h_m$=80 мм.

6.22. Зазор между главным полюсом и станиной (10.77)

$$\delta_{mc1} = 2l_m\cdot 10^{-4} + 0{,}1 = 2\cdot 258\cdot 10^{-4} + 0{,}1 = 0{,}15 \text{ мм}.$$

6.23. Магнитное напряжение зазора между главным полюсом и станиной (10.76)

$$F_{\delta mc} = 0{,}8B_m\, \delta_{mc1}\cdot 10^3 = 0{,}8\cdot 1{,}57\cdot 0{,}150\cdot 10^3 = 188 \text{ А}.$$

6.24. Магнитная индукция в спинке станины (10.79)

$$B_{c1} = \frac{\sigma_г\, \Phi\cdot 10^6}{2l_{c1}\, h_{c1}} = \frac{1{,}2\cdot 0{,}0256\cdot 10^6}{2\cdot 400\cdot 32} = 1{,}20 \text{ Тл},$$

полученное значение магнитной индукции мало отличается от принятого в п. 2.17.

6.25. Напряженность поля в спинке станины по табл. П.2.12 для массивных станин H_{c1}=1127 А/м.

6.26. Расчетная длина магнитной силовой линии в спинке станины (10.80)

$$L_{c1} = (\pi/2p)\,(D_{1вн} + h_{c1}) + h_{c1} = (\pi/4)\,(425 + 32) + 32 = 390 \text{ мм}.$$

6.27. Магнитное напряжение станины (10.78)

$$F_{c1} = H_{c1}\, L_{c1}\cdot 10^{-3} = 1127\cdot 390\cdot 10^{-3} = 440 \text{ А}.$$

6.28. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения на пару полюсов в режиме холостого хода (10.57)

$$F_{в0} = 2F_\delta + 2F_{z2} + F_{c2} + 2F_m + 2F_{\delta mc} + F_{c1} = 2\cdot 1787 + 2\cdot 509 + 55 + 2\cdot 73 + 2\cdot 188 + 440 = 5609 \text{ А}.$$

7. Обмотка возбуждения

7.1. Поперечная МДС обмотки якоря на пару полюсов (10.83)

$$F_2 = 0{,}5N_2\, I_{2ном}/2a_2p = 0{,}5\cdot 162\cdot 375/2\cdot 2 = 7594 \text{ А}.$$

7.2. Коэффициент, учитывающий размагничивающее действие МДС поперечной реакции якоря при B_{z2max}=2,24 Тл и $F_2/F_{в0}$=7594/5609=1,35 по рис. 10.20, $k_{р,я}$=0,185.

7.3. Размагничивающее действие МДС поперечной реакции якоря на пару полюсов (10.82)

$$F_{qd} = k_{р.я}\, F_2 = 0{,}185\cdot 7594 = 1405 \text{ А}.$$

7.4. Требуемое значение МДС обмотки возбуждения при нагрузке на пару полюсов (10.81)

$$F_{в,н} = F_{в0} + F_{qd} - F_c = 5609 + 1405 - 1139 = 5875 \text{ А},$$

где МДС стабилизирующей обмотки на пару полюсов (10.94)

$$F_c = 0{,}15F_2 = 0{,}15\cdot 7594 = 1139 \text{ А}.$$

7.5. Средняя длина витка многослойной полюсной катушки параллельного возбуждения (10.84)

$$l_{ср,к} = 2\,(l_m + b_m) + \pi\,(b_{к,ш} + 2b_{из} + 2b_з + 2b_к) = 2\,(258 + 77) + \pi\,(36 + 2\cdot 0{,}2 + 2\cdot 0{,}6 + 2\cdot 2) = 802 \text{ мм},$$

где ширина катушки (рис. 10.22) $b_{к,ш}=36$ мм, толщина изоляции катушки (табл. 10.14) $b_{из}=0{,}2$ мм, односторонний зазор между катушкой и сердечником полюса $b_з=0{,}6$; толщина каркаса $b_к=2$ мм.

7.6. Площадь поперечного сечения обмоточного провода (при последовательном соединении всех полюсных катушек) (10.88)

$$q'_в = F_{в,н} k_{зап} \rho_{Cu} p l_{ср,к} \cdot 10^3 / U_в =$$
$$= 5875 \cdot 1{,}05 \cdot 24{,}4 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 802 \cdot 10^3/220 = 1{,}097 \text{ мм}^2.$$

По табл. 10.16 принимаем катушку возбуждения из изолированного провода круглого сечения, многослойную по ширине и высоте; принимаем провод марки ПЭТ-155 $q_в=1{,}094$ мм², $d=1{,}18$ мм, $d_{из}=1{,}26$ мм.

7.7. Число витков в полюсной катушке (10.89)

$$w_{к,в} = F_{в,н}/2\Delta'_в q_в = 5875/2 \cdot 4{,}2 \cdot 1{,}094 = 640,$$

где плотность тока по рис. 10.24 $\Delta'_в=4{,}2$ А/мм².

7.8. Сопротивление обмотки возбуждения (10.90)

$$r_в = \rho_{Cu} \cdot 2pw_{к,в}\, l_{ср,к} \cdot 10^3/q_в = 24{,}4 \cdot 10^{-9} \cdot 4 \cdot 640 \cdot 802 \cdot 10^3/1{,}094 = 46 \text{ Ом}.$$

7.9. Наибольшее значение тока возбуждения (10.91)

$$I_в = U_в/r_в = 220/46 = 4{,}78 \text{ А}.$$

7.10. Уточненное значение плотности тока в обмотке возбуждения (10.92)

$$\Delta_в = I_в/q_в = 4{,}78/1{,}094 = 4{,}37 \text{ А/мм}^2.$$

7.11. Число витков в полюсной катушке стабилизирующей обмотки (10.93)

$$w_{к,с} = F_с a_с / I_{2ном} = 1139 \cdot 1/375 = 1{,}54,$$

принимаем $w_{к,с}=2$, число параллельных ветвей $a_с=1$.

7.12. Площадь поперечного сечения обмоточного провода стабилизирующей обмотки (10.95)

$$q'_с = I_{2ном}/a_с \Delta_с = 375/1 \cdot 4{,}3 = 87{,}2 \text{ мм}^2.$$

7.13. По табл. 10.17 принимаем для изготовления полюсных катушек стабилизирующей обмотки неизолированный медный провод прямоугольного сечения, гнутый на ребро. Стандартный размер провода по табл. П.1.2

$$b \times a = 22 \times 3{,}8 \text{ мм}; \quad q_с = 83{,}12 \text{ мм}^2.$$

7.14. Уточненное значение плотности тока в стабилизирующей обмотке (10.96)

$$\Delta_с = I_{2ном}/a_с q_с = 375/1 \cdot 83{,}12 = 4{,}5 \text{ А/мм}^2.$$

7.15. Радиус закругления медного провода катушки стабилизирующей обмотки (10.86)

$$r = 0{,}5\,(b_с + 2b_з) = 0{,}5\,(22 + 2 \cdot 0{,}6) = 11{,}6 \text{ мм};$$

минимально допустимый радиус закругления (10.87)

$$r_{min} = 0{,}05b^2/a = 0{,}05 \cdot 22^2/3{,}8 = 6{,}4 \text{ мм}.$$

7.16. Средняя длина витка катушки стабилизирующей обмотки (10.85)

$$l_{ср,к} = 2\,(l_m + b_m) + \pi\,(b_{к,с} + 2r) = 2\,(258 + 77) + \pi\,(22 + 2 \cdot 11{,}6) = 810 \text{ мм},$$

где $b_{к,с}=b=22$ мм.

7.17. Сопротивление стабилизирующей обмотки (10.97)

$$r_с = \frac{2p\rho_{Cu}\, l_{ср,к}\, w_{к,с} \cdot 10^3}{a_с^2 q_с} = \frac{4 \cdot 24{,}4 \cdot 10^{-9} \cdot 810 \cdot 2 \cdot 10^3}{1^2 \cdot 83{,}12} = 0{,}0019 \text{ Ом}.$$

8. Обмотка добавочных полюсов

8.1. Число витков катушки добавочного полюса (10.98)

$w_{к,д}=k_д F_2 a_д / 2I_{2ном}=1{,}25 \cdot 75941/2 \cdot 375=12{,}65$ витков,

принимаем $w_{к,д}=13$ витков, где $a_д=1$, $k_д=1{,}25$ (табл. 10.18).

8.2. Площадь поперечного сечения проводника катушки добавочного полюса (10.99)

$$q'_д = I_{2ном}/a_д \Delta_д = 375/1 \cdot 4{,}3 = 87{,}2 \text{ мм}^2,$$

по рис. 10.24 $\Delta_д=4{,}3$ А/мм².

8.3. Принимаем для изготовления катушек добавочных полюсов голый медный провод прямоугольного сечения по табл. П.1.2

$$b \times a = 18{,}0 \times 5{,}1 \text{ мм}; \quad q_д = 90{,}94 \text{ мм}^2.$$

8.4. Уточненное значение плотности тока в обмотке добавочных полюсов (10.100)

$$\Delta_д = I_{2ном}/a_д q_д = 375/1 \cdot 90{,}94 = 4{,}12 \text{ А/мм}^2.$$

8.5. Средняя длина витка катушки добавочного полюса (10.103)

$$l_{ср,к} = 2l_д + \pi\,(b_д + b_{к,д} + 2b_з + 2b_{из}) = 2 \cdot 258 + \pi\,(30 + 18{,}0 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 2) =$$
$$= 700 \text{ мм},$$

где $b_{к,д}=b=16{,}8$ мм; $b_з=3$ мм; $b_{из}=2$ мм.

8.6. Радиус закругления медного провода катушки (10.86)

$$r = 0{,}5\,(b_{к,д} + 2b_з) = 0{,}5\,(16{,}8 + 2 \cdot 3) = 11{,}4 \text{ мм},$$

что больше $r_{min}=0{,}05 \cdot 16{,}8^2/4{,}7=3$ мм.

8.7. Сопротивление обмотки добавочных полюсов (10.104)

$$r_д = \frac{\rho_{Cu}\, l_{ср,к}\, w_{к,д}\, 2p_д \cdot 10^3}{a_д^2 q_д} = \frac{24{,}4 \cdot 10^{-9} \cdot 700 \cdot 13 \cdot 4 \cdot 10^3}{1^2 \cdot 90{,}94} = 0{,}0097 \text{ Ом}.$$

9. Размещение обмоток главных и добавочных полюсов

9.1. Ширина многослойной катушки главного полюса (10.106)

$$b_{к,в} = k_р N_ш d_{из} + b_{из,пр} = 1{,}05 \cdot 28 \cdot 1{,}26 + 2{,}4 = 39{,}4 \text{ мм},$$

где $N_ш=b_{к,ш}/d_{из}=36/1{,}26=28$; $k_р=1{,}05$; $b_{из,пр}=2+2 \cdot 0{,}2=2{,}4$ мм.

9.2. Высота многослойной катушки главного полюса с учетом разделения полюсной катушки на две части вентиляционным каналом шириной $b_{в,к}=8$ мм

$$h_{к,в} = k_р N_в d_{из} + h_{из,пр} + b_{в,к} = 1{,}05 \cdot 23 \cdot 1{,}26 + 12 + 8 = 50{,}4 \text{ мм},$$

где $N_в$ — число изолированных проводов по высоте катушки:

$$N_в = w_{к,в}/N_ш = 632/28 = 23;$$

высота прокладок и каркаса (табл. 10.14)

$$h_{из,пр} = 2 \cdot 1{,}5 + 4 \cdot 2 + 4 \cdot 0{,}2 = 12 \text{ мм}.$$

9.3. Высота полюсной катушки стабилизирующей обмотки (см. табл. 10.14)

$$h_{к,с} = h + h_{из,пр} = 3{,}8 + 3{,}4 = 7{,}2 \text{ мм},$$

где h=3,8 мм; $h_{из,пр}$=1,5+2·0,2+1,5=3,4 мм.

9.4. Общая высота катушек и вентиляционного канала главного полюса

$$h_{г,п} = 50,4 + 7,2 = 57,6 \text{ мм}.$$

9.5. Площадь, занимаемая непосредственно в межполюсном окне двумя частями (секциями) катушки возбуждения, включая все прокладки и вентиляционный зазор 8 мм,

$$Q_{к\,в} = b_{к,в}\, h_{к,в} = 39,4 \cdot 50,4 = 1985 \text{ мм}^2.$$

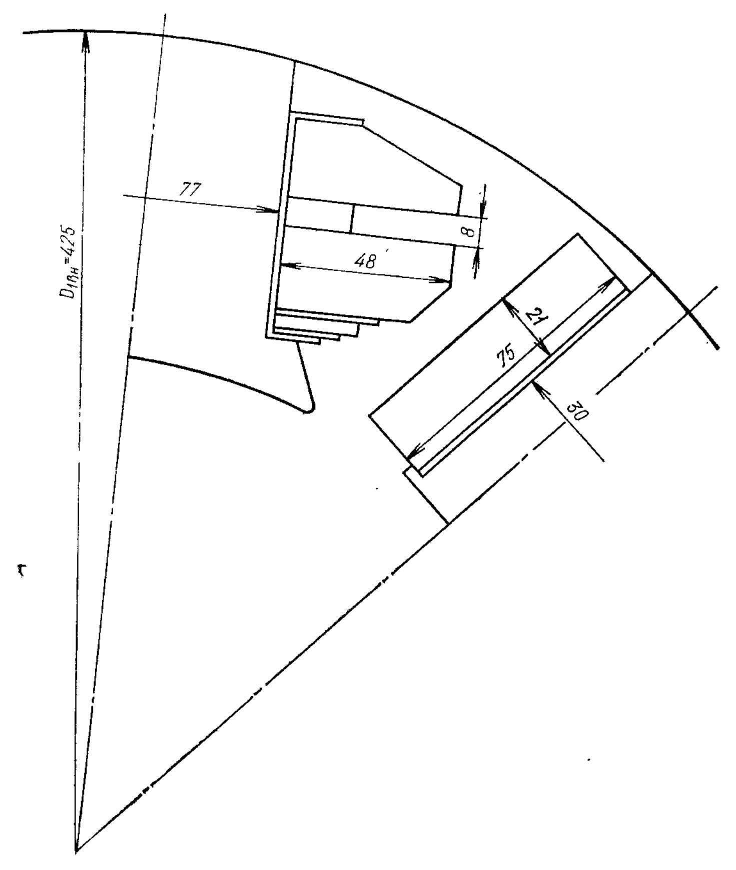


Рис. 10.42. Эскиз междуполюсного окна двигателя постоянного тока (75 кВт, 220 В, 1500 об/мин)

9.6. Ширина полюсной катушки добавочного полюса из неизолированной меди прямоугольного сечения

$$b_{к,д} = b_д + b_з = 18,0 + 3 = 21,0 \text{ мм},$$

где $B_з$=3 мм (см. п. 8.5).

9.7. Высота катушки добавочного полюса из неизолированной меди (10.110)

$$h_{к,д} = k_р\, [w_{к,д}\, h + 0,3\, (w_{к,д} - 3)] + 2 = 1,05\, [13 \cdot 5,1 + 0,3\, (13 - 3)] + 2 = 75 \text{ мм}.$$

9.8. На рис. 10.42 показан эскиз междуполюсного окна. При этом площадь, занимаемая полюсной катушкой возбуждения из двух секций, включая вентиляционный зазор 8 мм, составляет $Q_{к,в}$=1985 мм², а компоновка этих секций такова, что минимальный воздушный промежуток между выступающими краями главных и добавочных полюсов, а также между краями полюсных катушек и внутренней поверхностью станины составляет 8 мм (см. §10.10).

10. Щетки и коллектор

10.1. Расчетная ширина щетки (10.131)

$$b'_щ = k_{з,к}\, b_{н,з}\, \frac{D_к}{D_2} - t_к \left(N_щ + \varepsilon_к - \frac{a_2}{p}\right) = 0,70 \cdot 71\, \frac{180}{258} - 7\left(4 + 0,25 - \frac{1}{2}\right) = 8,3 \text{ мм};$$

здесь $k_{з,к}$=0,70 (см. табл. 10.21); $t_к$=7 мм; $b_{н,з}=\tau - b_р$=202—131=71 мм; $\varepsilon_к$=0,25.

По табл. 10.21 принимаем стандартную ширину щетки $b_щ$=20 мм.

10.2. Число перекрываемых щеткой коллекторных делений (10.133)

$$\gamma = b_щ / t_к = 20/7 = 2,85,$$

что находится в пределах рекомендуемых значений для простой волновой обмотки якоря

10.3. Контактная площадь всех щеток (10.134)

$$\Sigma S_щ = 2I_{2ном} / \Delta'_щ = 2 \cdot 375/0,11 = 6818 \text{ мм}^2,$$

где $\Delta'_щ$ принимаем по табл. 2.2: для электрографитированных щеток марки ЭГ14 $\Delta_щ$=0,11 А/мм².

10.4. Контактная площадь щеток одного бракета (10.135)

$$S_{щ,б} = \Sigma S_щ / 2p = 6818/4 = 1704 \text{ мм}^2.$$

10.5. Требуемая длина щетки (10.136)

$$l'_щ = S_{щ,б} / b_щ = 1704/20 = 85 \text{ мм},$$

принимаем на одном бракете по пять щеток ($N_{щ,б}$=5). Длина одной щетки $l_щ$=25 мм.

10.6. Плотность тока под щеткой (10.138)

$$\Delta_щ = 2I_{2ном} / N_{щ,б}\, b_щ\, l_щ \cdot 2p = 2 \cdot 375/5 \cdot 20 \cdot 25 \cdot 4 = 0,075 \text{ А/мм}^2,$$

что не превышает рекомендуемого значения $\Delta'_щ$=0,11 А/мм².

10.7. Активная длина коллектора при шахматном расположении щеток (10.139)

$$l_к = N_{щ,б}\, (l_щ + 8) + 10 = 5\, (25 + 8) + 10 = 170 \text{ мм}.$$

10.8. Ширина коллекторной пластины (10.140)

$$b_к = t_к - b_{из} = 7 - 0,8 = 6,2 \text{ мм},$$

толщина изоляционной прокладки $b_{из}$=0,8 мм.

11. Расчет коммутации

11.1. Окружная скорость якоря

$$v_2 = \pi D_2 n \cdot 10^{-3}/60 = \pi \cdot 258 \cdot 1500 \cdot 10^{-3}/60 = 20,26 \text{ м/с}.$$

11.2. Приведенный коэффициент проводимости пазового рассеяния якоря при прямоугольных пазах (10.143)

$$\lambda = 0,6\frac{h_{z2}}{b_{п2}} + \frac{l_{л2}}{l_2} + \frac{2,5\cdot 10^8}{w_{c2}\, l_2\, A_2\, v_2}\,\frac{a_2}{p} =$$

$$= 0,6\frac{31,1}{11,6} + \frac{288}{258} + \frac{2,5\cdot 10^8}{1\cdot 258\cdot 375\cdot 10^2\cdot 20,26}\,\frac{1}{2} = 3,28.$$

11.3. Реактивная ЭДС (10.141)

$$E_р = 2w_{c2}\, l_i\, A_2 v_2 \lambda\cdot 10^{-5} = 2\cdot 1\cdot 258\cdot 375\cdot 10^{-2}\cdot 20,26\cdot 3,28\cdot 10^{-5} = 1,28 \text{ В}.$$

При максимальной частоте вращения n_{max}=2200 об/мин (v_{2max}=29,56 м/с) реактивная ЭДС $E_{р\,max}$=1,28·(29,56/20,26)=1,86 В, что не превышает допустимого предельного значения (5 В).

12. Потери и КПД

12.1. Масса зубцового слоя якоря (10.151)

$$G_{z2} = 7,8\cdot 10^{-6} Z_2 b_{z2ср}\, h_{z2}\, l_i\, k_с = 7,8\cdot 10^{-6}\cdot 27\cdot 14,5\cdot 31,1\cdot 258\cdot 0,95 = 23,3 \text{ кг}.$$

12.2. Масса стали спинки якоря (10.153)

$$G_{c2} = 7,8\cdot 10^{-6}\left\{(\pi/4)\left[\left(D_2 - 2h_{z2}\right)^2 - D_{2вн}^2 - d_{к2}^2\, n_{к2}\right]\right\} l_i\, k_с =$$

$$= 7,8\cdot 10^{-6}\{(\pi/4)[(258-2\cdot 31,1)^2 - 80^2 - 18^2\cdot 18]\}\cdot 258\cdot 0,95 = 40,9 \text{ кг}.$$

12.3. Магнитные потери в сердечнике якоря (10.149)

$$P_{м2} = 2,3P_{1,0/50}\left(f_2/50\right)^{\beta}\left(B_{z2ср}^2\, G_{z2} + B_{c2}^2\, G_{c2}\right) = 4,02\,(1,64^2\cdot 23,3 + 1,11^2\cdot 40,9) =$$

$$= 459 \text{ Вт},$$

где $f_2 = pn/60 = 2\cdot 1500/60 = 50$ Гц; $B_{1,0/50}$=1,75 Вт/кг; β=1,4; по рис. 10.32 принимаем

$$2,3P_{1,0/50}\left(f_2/50\right)^{1,4} = 4,02 \text{ Вт/кг}.$$

12.4. Электрические потери в обмотке возбуждения (10.158)

$$P_{э,в} = U_в^2/r_в = 220^2/46 = 1052 \text{ Вт}.$$

12.5. Электродвижущая сила якоря при номинальной нагрузке двигателя (10.157)

$$E_{2ном} = \frac{pN_2}{60a_2}\,\Phi n_{ном} = \frac{2\cdot 162}{60\cdot 1}\,0,0256\cdot 1500 = 207,4 \text{ В}.$$

12.6. Уточненное значение тока якоря при номинальной нагрузке (10.155)

$$I_{2ном} = (U_{ном} - E_{2ном} - \Delta U_{щ})/\Sigma r = (220 - 207,4 - 2,5)/0,027 = 374,1 \text{ А};$$

$$\Sigma r = r_2 + r_с + r_д = 0,0166 + 0,0096 + 0,0019 = 0,027 \text{ Ом};$$

$\Delta U_щ$= 2,5 В (см. табл. 2.2 для щеток ЭГ14).

12.7. Электрические потери в обмотке якоря (10.154)

$$P_{э2} = I_{2ном}^2\, r_2 = 374,1^2\cdot 0,0166 = 2320 \text{ Вт}.$$

12.8. Электрические потери в обмотках статора, включенных последовательно с обмоткой якоря (10.159),

$$P_{э,п1} = I_{2ном}^2\left(r_д + r_с\right) = 374,1^2\,(0,0096 + 0,0019) = 1610 \text{ Вт}.$$

12.9. Электрические потери в переходном щеточном контакте (10.160)

$$P_{э,щ} = \Delta U_щ\, I_{2ном} = 2,5\cdot 374,1 = 935 \text{ Вт}.$$

12.10. Потери на трение щеток о коллектор (10.162)

$$P_{т,щ} = 0,5\Sigma S_щ\, v_к = 0,5\cdot 62,5\cdot 14,3 = 441 \text{ Вт},$$

где окружная скорость на коллекторе $v_к = \pi D_к n_{ном}/60\cdot 10^{-3} = \pi\cdot 180\cdot 1500/60\cdot 10^{-3}$ = =14,13 м/с.

12.11. Потери на трение в подшипниках и на вентиляцию (рис. 10.33) $P_{т,п,в}$= =600 Вт.

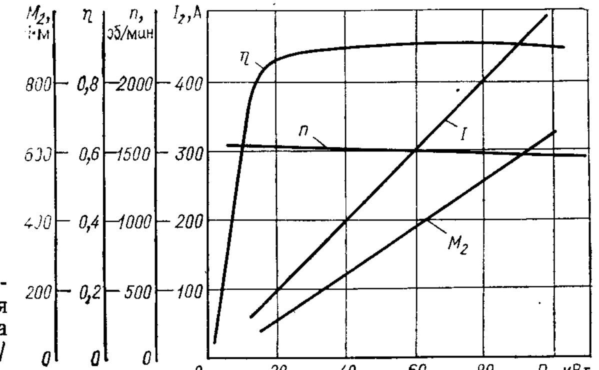


Рис. 10.43. Рабочие характеристики двигателя постояниого тока (75 кВт, 220 В, 1500 об/мин)

12.12. Суммарные механические потери (10.161)

$$P_{мех} = P_{т,щ} + P_{т,п,в} = 441 + 600 = 1041 \text{ Вт}.$$

12.13. Добавочные потери (10.163)

$$P_{доб} = 0,01P_{ном}/\eta_{ном}'\cdot 10^{-3} = 0,01\cdot 75/0,89\cdot 10^{-3} = 843 \text{ Вт}.$$

12.14. Суммарные потери в двигателе (10.148)

$$\Sigma P = (P_{м2} + P_{э2} + P_{э,в} + P_{э,п1} + P_{э,щ} + P_{мех} + P_{доб})\cdot 10^{-3} =$$

$$= (459 + 2320 + 1052 + 1610 + 935 + 1041 + 843)\cdot 10^{-3} = 8,26 \text{ кВт}.$$

12.15. Коэффициент полезного действия двигателя при номинальной нагрузке (10.167)

$$\eta_{д,ном} = 1 - \Sigma P/P_1 = 1 - 8,26/83,35 = 0,90,$$

где $P_1 = U_{ном}(I_{2\,ном} + I_в)\cdot 10^{-3} = 220(374,1 + 4,78)\cdot 10^{-3} = 83,35$ кВт.

13. Рабочие характеристики двигателя

Расчет рабочих характеристик двигателя приведен в табл. 10.24. По данным этой таблицы построены рабочие характеристики (рис. 10.43).

14. Тепловой расчет

14.1. Превышение температуры поверхности сердечника якоря над температурой воздуха внутри машины (10.177)

$$\Delta\Theta_{пов2} = \frac{P_{э2}\,(2l_2/l_{ср2}) + P_{м2}}{(\pi D_2 + n_{к2}\, d_{к2})\, l_2\alpha_2} = \frac{2320\,(2\cdot 258/1092) + 459}{(\pi\cdot 258 + 18\cdot 18)\cdot 258\cdot 9\cdot 10^{-5}} = 59,9\,^{\circ}\text{C},$$

где $\alpha_2 = 9\cdot 10^{-5}$ Вт/(мм²·°С) (см. рис. 10.34).

Таблица 10.24

$\beta=I_2/I_{2ном}$	0,2	0,5	0,75	1,0	1,25
I_2, А	75	187	280	374,1	469
$P_{м2}+P_{э,в}+P_{мех}$, Вт	2552	2552	2552	2552	2552
$P_{э2}$, Вт	93	577	1294	2320	3629
$P_{э,п1}$, Вт	68	428	960	1610	2695
$P_{э,щ}$, Вт	187	468	703	935	1171
$P_{доб}$, Вт	34	211	474	843	1317
ΣP, кВт	2,93	4,23	5,98	8,26	11,36
$I=I_2+I_в$, А	79,8	191,8	284,8	379	473,8
$P_1=U_{ном}I\cdot 10^{-3}$, кВт	17,5	42,2	62,65	83,35	104,2
η	0,833	0,900	0,905	0,900	0,891
$P_2=P_1\eta$	14,6	37,98	56,69	75,0	92,8
E_2, В	215,3	212,1	209,4	207,4	204,0
n, об/мин	1556	1533	1514	1500	1475
M_2, Н·м	89,6	236,6	357,5	477,5	600,8

14.2. Периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза якоря (10.180)

$$\Pi_2 = 2\,(b_{п2}+h_{z2}) = 2\,(11,6+31,1) = 85,4 \text{ мм}.$$

14.3. Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки якоря (10.178)

$$\Delta\Theta_{из2} = \frac{P_{э2}\,(2l_2/l_{ср2})}{Z_2\Pi_2 l_2}\,\frac{C_{b2}}{\lambda_{экв}} = \frac{2320\,(2\cdot 258/1092)}{27\cdot 85,4\cdot 258}\,\frac{1,7}{16\cdot 10^{-5}} = 19,3\,°C.$$

14.4. Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки якоря над температурой воздуха внутри машины (10.181)

$$\Delta\Theta_{л2} = \frac{P_{э2}\,(2l_{л2}/l_{ср2})}{2\cdot 2\pi D_2 l_{в2}\,\alpha_2} = \frac{2320\,(2\cdot 258/1092)}{2\cdot 2\cdot\pi\cdot 258\cdot 91\cdot 9\cdot 10^{-5}} = 41\,°C.$$

14.5. Перепад температуры в изоляции лобовых частей обмотки (10.182)

$$\Delta\Theta_{из,л2} = \frac{P_{э2}\,(2l_{л2}/l_{ср2})}{2Z_2\Pi_{л2}\,l_{л2}}\,\frac{C_{л2}}{\lambda_{экв}} = \frac{2320\,(2\cdot 258/1092)}{2\cdot 27\cdot 85,4\cdot 288}\,\frac{1}{16\cdot 10^{-5}} = 5,0\,°C,$$

где $\Pi_{л2}\approx\Pi_2=85,4$ мм.

14.6. Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой воздуха внутри машины (10.185)

$$\Delta\Theta_2' = \frac{2l_2}{l_{ср2}}\,(\Delta\Theta_{пов2}+\Delta\Theta_{из2}) + \frac{2l_{л2}}{l_{ср2}}\,(\Delta\Theta_{л2}+\Delta\Theta_{из,л2}) =$$

$$= \frac{2\cdot 258}{1092}\,(59,9+19,3) + \frac{2\cdot 288}{1092}\,(41+5,0) = 61,7\,°C.$$

14.7. Сумма потерь $\Sigma P' = \Sigma P - 0,1\,(P_{э,в}+P_{э,п1}) = 8380 - 0,1\,(1052+1729) = 8102$ Вт.

14.8. Условная поверхность охлаждения машины (10.188)

$$S_м = \pi D_i\,(l_2+2l_{в2}) = \pi\cdot 485\,(258+2\cdot 91) = 670,0\cdot 10^3 \text{ мм}^2.$$

14.9. Среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой охлаждающей среды (10.186)

$$\Delta\Theta_в = \Sigma P'/S_м\,\alpha_в = 8102/670,0\cdot 10^3\cdot 110\cdot 10^{-5} = 11,0\,°C,$$

где $\alpha_в = 110\cdot 10^{-5}$ Вт/(мм²·°C) (см. рис. 10.35).

14.10. Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающей среды (10.189)

$$\Delta\Theta_2 = \Delta\Theta_2' + \Delta\Theta_в = 61,7 + 11,0 = 72,7\,°C.$$

14.11. Условная поверхность охлаждения полюсной катушки возбуждения (10.191)

$$S_{к,в} = l_{ср,к}\,\Pi_{к,в} = 802\cdot 106 = 85\,012 \text{ мм}^2,$$

где $\Pi_{к,в}=106$ мм (см. рис. 10.37).

14.12. Превышение температуры наружной поверхности охлаждения многослойной катушки главного полюса над температурой воздуха внутри машины (10.190)

$$\Delta\Theta_{к,в} = 0,9P_{э.в}/2pS_{к,в}\,\alpha_1 = 0,9\cdot 1052/(4\cdot 85\,012\cdot 6\cdot 10^{-5}) = 46,4\,°C,$$

где $\alpha_1 = 6\cdot 10^{-5}$ Вт/(мм²·°C) (см. рис. 10.38, *б*).

14.13. Перепад температуры в изоляции полюсной катушки главного полюса (10.192)

$$\Delta\Theta_{из,к,в} = 0,9\,\frac{P_{э,в}}{2pS_{к,в}}\,\frac{b_{из}}{\lambda_{экв}} = 0,9\,\frac{1052}{4\cdot 85\,012}\,\frac{0,2}{16\cdot 10^{-5}} = 3,5\,°C.$$

14.14. Среднее превышение температуры катушки главного полюса над температурой внутри машины (10.193)

$$\Delta\Theta_{к,в}' = \Delta\Theta_{к,в} + \Delta\Theta_{из,к,в} = 46,4 + 3,5 = 49,9\,°C.$$

14.15. Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды (10.194)

$$\Delta\Theta_{о,в} = \Delta\Theta_{к,в}' + \Delta\Theta_в = 49,9 + 11 = 60,9\,°C.$$

14.16. Условная поверхность охлаждения однослойной катушки добавочного полюса (10.197)

$$S_д = l_{ср,к}\,(w_д\,a + 0,6b) = 700\,(13\cdot 5,1 + 0,6\cdot 18) = 54\cdot 10^3 \text{ мм}^2,$$

где $l_{ср,к}=700$ мм.

14.17. Электрические потери в добавочном полюсе

$$P_{э,д} = I_{2ном}^2\,r_д/a_д = 374,1^2\cdot 0,0096/1 = 1344 \text{ Вт}.$$

14.18. Превышение температуры наружной поверхности добавочного полюса над температурой воздуха внутри машины (10.195)

$$\Delta\Theta_{к,д} = 0,9P_{э,д}/2pS_д\,\alpha_1 = 0,9\cdot 1344/4\cdot 54\cdot 10^3\cdot 6\cdot 10^{-5} = 93\,°C.$$

14.19. Среднее превышение температуры обмотки добавочного полюса над температурой охлаждающей среды (10.204)

$$\Delta\Theta_д = \Delta\Theta_{к,д} + \Delta\Theta_в = 93 + 11 = 104\,°C.$$

14.20. Превышение температуры наружной поверхности коллектора над температурой воздуха внутри машины (10.217)

$$\Delta\Theta_{кол}' = \frac{P_{э,щ}+P_{т,щ}}{S_{кол}\,\alpha_{кол}} = \frac{937+441}{96\cdot 10^3\cdot 22\cdot 10^{-5}} = 65,2\,°C,$$

где $S_{кол} = \pi D_к l_к = \pi 180 \cdot 170 = 96 \cdot 10^3$ мм²; $\alpha_{кол} = 22 \cdot 10^{-5}$ Вт/(мм²·°С) (см. рис. 10.41).

14.21. Превышение температуры коллектора над температурой охлаждающей среды при входе воздуха со стороны коллектора (10.216)

$$\Delta\Theta_{кол} = \Delta\Theta'_{кол} = 65{,}2\ °С.$$

Таким образом, тепловой расчет показал, что превышение температуры различных частей двигателя не превышает допустимых значений для изоляции класса нагревостойкости F.

Глава одиннадцатая

КОНСТРУИРОВАНИЕ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

11.1. СТАНИНА И ПОЛЮСЫ

Станина. Станина выполняет две функции: она является корпусом машины и одновременно служит элементом ее магнитной системы. В машинах с высотой оси вращения $h \leqslant 200$ мм станины обычно делают из стальных цельнотянутых труб, а в машинах с $h \geqslant 225$ мм — сварными из стальных листов, сворачивая их в цилиндр и накладывая продольный сварной шов. Ввиду того что магнитные свойства сварного шва ухудшены, станину располагают таким образом, чтобы шов находился на оси одного из главных полюсов.

Для уменьшения габаритов машины станине иногда придают многоугольную форму, при $2p = 4$ — восьмиугольную (рис. 11.1).

Площадь поперечного сечения станины, полученная по расчету магнитной цепи машины, как правило, оказывается достаточной для обеспечения требуемой прочности и жесткости станины. При необходимости придания станине большей жесткости ее несколько удлиняют в сторону расположения коллектора. При этом удлиненная часть станины имеет меньшую толщину.

Станины имеют кольцевые центрирующие заточки (замки) для посадки подшипниковых щитов. Подшипниковые щиты крепят к станине болтами.

Вводное устройство (коробку выводов) располагают на верхней или боковой поверхности станины, в машинах с высотой оси вращения $h = 225 \div 315$ мм его располагают на торцевой нижней части подшипников щита со стороны коллектора.

Для удобства транспортировки и монтажа станины массой более 30 кг снабжают либо рым-болтами, вворачиваемыми в тело станины, либо специальными проушинами, привариваемыми к станине (см. рис. 10.1).

Главные полюсы. Главные полюсы делают шихтованными из штампованных листов электротехнической холоднокатаной стали толщиной 1 мм. Крайние листы (щеки) делают более толстыми (4—10 мм) с размерами несколько меньше размеров полюса. Листы каждого полюса, собранные в пакет, спрессовывают под дав-

лением 2,0—2,5 МПа и скрепляют заклепками, равномерно распределенными по поверхности полюса. Общая площадь заклепок должна быть не менее $2 \cdot 10^{-2}$ общей площади поверхности листов полюса. При этом число заклепок должно быть не менее четырех. Заклепки вставляют в отверстия листов полюса, диаметр которых должен быть на 0,2 мм больше диаметра заклепки, и развальцовывают в конических углублениях крайних листов (рис. 11.2).

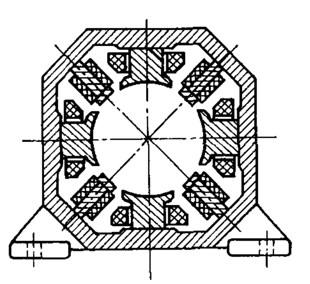
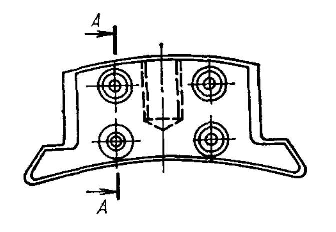


Рис. 11.1. Восьмигранная станина



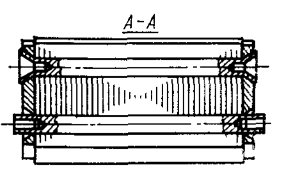


Рис. 11.2. Сердечник главного полюса

Главные полюсы крепят к станине болтами, вворачиваемыми в отверстия в теле шихтованного полюса (рис. 11.3, *а*). В более крупных машинах, а также в машинах, подверженных вибрациям, полюсы крепят к станине болтами, вворачиваемыми в стальные стержни, вставленные в отверстия полюса (рис. 11.3, *б*).

Расчет болтов для крепления главных полюсов ведут по сдвигающей силе, Н, обусловленной действием электромагнитного момента, направленной перпендикулярно оси полюса:

$$F = kM_{ном}/pD_2 \cdot 10^{-3}, \tag{11.1}$$

где k — коэффициент нагрузки, принимают $k = 2 \div 3$; $M_{ном}$ — номинальный момент машины, Н·м [см. (10.172)].

Принимая коэффициент трения между станиной и главным полюсом равным 0,2, площадь поперечного сечения (по внутреннему диаметру резьбы) болтов, крепящих один полюс, мм², можно определить по формуле

$$S_б = (F + 9{,}81 m_{г.п})/0{,}2 \cdot 10^{-6}\sigma, \tag{11.2}$$

где $m_{г.п}$ — масса главного полюса с полюсной катушкой, кг; σ — допустимое напряжение растяжения, для стали Ст 3 $\sigma = 160$ МПа, а для стали Ст 5 $\sigma = 200$ МПа.

Диаметр болта по внутреннему диаметру резьбы, мм,

$$d_б = 2\sqrt{S_б/\pi N_б}, \quad (11.3)$$

где $N_б$ — количество болтов на один полюс.

Полученное по (11.3) значение $d_б$ округляют до ближайшего большего стандартного значения.

Для предотвращения смещения полюса относительно станины число болтов, приходящихся на один полюс, должно быть не менее двух. Диаметр крепящего болта должен быть не менее 10—12 мм, иначе возможен обрыв болта при его затяге.

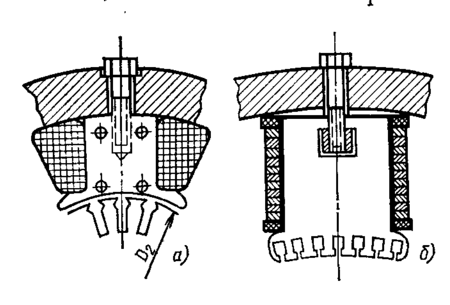


Рис. 11.3. Крепление главных полюсов к станине

Конструкция добавочных полюсов изложена в § 10.1. Для регулировки зазоров между добавочными полюсами и станиной при настройке коммутации в машине применяют прокладки, которые располагают между станиной и сердечником добавочного полюса. При $h<315$ мм применяют прокладки из магнитной стали, а при $h\geqslant315$ мм магнитные прокладки чередуют с немагнитными.

Добавочные полюсы не участвуют в создании электромагнитного момента машины, поэтому расчет болтов для крепления добавочных полюсов производится лишь по силе магнитного взаимодействия между добавочным полюсом и соседними главными полюсами. Болты, которые крепят добавочный полюс к станине, вворачивают либо в резьбовое отверстие непосредственно в сердечнике полюса, либо в резьбовое отверстие стальной полосы, вставленной в отверстие сердечника, аналогично креплению главного полюса (см. рис. 11.2). Часто в целях унификации для крепления добавочных полюсов применяют те же болты, что и для крепления главных полюсов.

11.2. СЕРДЕЧНИК И ОБМОТКА ЯКОРЯ

Сердечник якоря. Пакет сердечника якоря при $D_2\leqslant600$ мм насаживают непосредственно на вал. Для предотвращения распушения пакета сердечника якоря его крайние листы делают утолщенными путем соединения нескольких листов толщиной 0,5 мм точечной сваркой. Пакет якоря спрессовывают под давлением 1,5 МПа между двумя нажимными шайбами и затем запирают его на валу либо пружинным кольцом (рис. 11.4, *а*), закладываемым в кольцевую канавку вала, либо втулкой, насаживаемой на вал с горячей посадкой (рис. 11.4, *б*).

При высоте оси вращения $h\geqslant200$ мм нажимные шайбы снабжают обмоткодержателями, которые служат опорой для лобовых

частей обмотки якоря. В машинах с высотой оси вращения $h\leqslant$ $\leqslant315$ мм обмоткодержатели чугунные литые, а при больших высотах — стальные сварные. Поверхность обмоткодержателей, на которую опирается лобовая часть обмотки, должна быть электрически изолирована.

Сердечники якорей со всыпными обмотками, не имеющие обмоткодержателей, изолируют по торцам текстолитовыми (при классе нагревостойкости В) или стеклотекстолитовыми (при классах F и

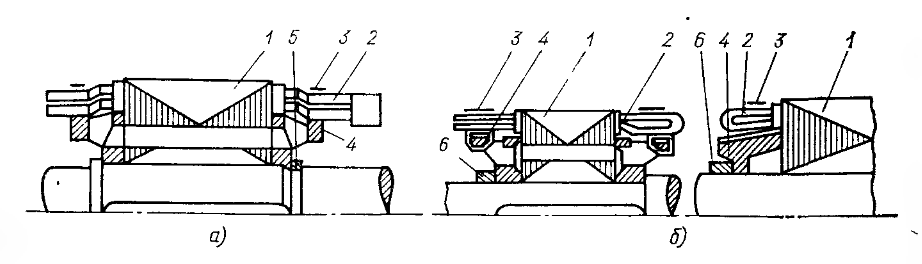


Рис. 11.4. Конструкция якоря при посадке сердечника непосредственно на вал:

1 — сердечник; *2* — лобовые части обмотки; *3* — бандаж; *4* — нажимная шайба (обмоткодержатель); *5* — пружинное кольцо; *6* — втулка

Н) шайбами. Части вала, к которым возможно прикосновение лобовых частей обмотки, изолируют пластмассовыми втулками.

Для предотвращения проворачивания сердечника якоря на валу при передаче вращающего момента применяют посадку сердечника на призматическую шпонку из стали Ст. 5.

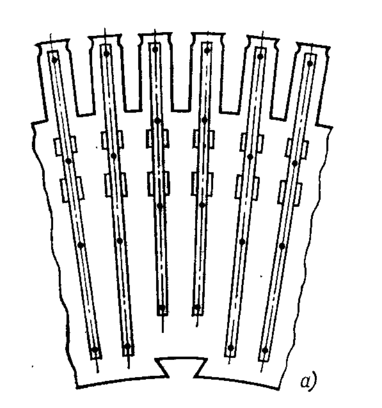
Для образования радиальных вентиляционных каналов в сердечнике якоря применяют специальные распорки (рис. 11.5, *а*). Иногда для предотвращения выпадения распорок из вентиляционного канала сердечника якоря их делают изогнутыми (рис. 11.5, *б*).

Обмотка якоря. При вращении якоря на все его элементы действуют центробежные силы. Эти силы стремятся распушить лобовые части обмотки якоря и выбросить из пазов сердечника пазовые части обмотки. Для предотвращения этого применяют бандажи и клинья.

Бандаж накладывают на лобовые части обмотки якоря, а в некоторых конструкциях якоря с открытыми пазами — и на пазовые части обмотки якоря, располагая его в специальных кольцевых канавках на поверхности сердечника (рис. 11.6). Под бандаж подкладывают прокладку из миканита толщиной 0,5—1,0 мм и шириной на 10—15 мм больше ширины бандажа.

При окружных скоростях якоря $v_2>35$ м/с применение бандажа на пазовой части обмотки становится нецелесообразным, так как по условиям прочности этот бандаж необходимо накладывать на значительную часть поверхности сердечника, что ухудшает условия охлаждения обмотки якоря. Кроме того, широкие кольцевые канавки на якоре увеличивают магнитное сопротивление основному магнитному потоку, что ведет к росту МДС обмотки возбуждения.

Наличие проволочного бандажа ведет к дополнительным потерям, а если этот бандаж выполнен магнитной проволокой, то это ухудшает коммутацию в машине. Исходя из перечисленных соображений в машинах с окружной скоростью якоря более 35 м/с для закрепления пазовых частей обмотки якоря применяют клинья.



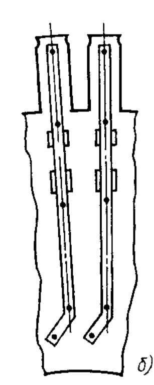


Рис. 11.5. Конструкция распорок сердечника якоря

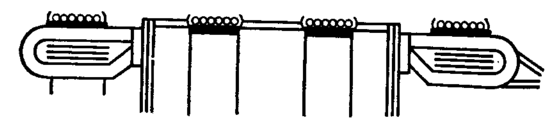


Рис. 11.6. Расположение бандажа на якоре

Расчет бандажа. Бандаж испытывает напряжение растяжения от центробежных сил, действующих на элементы обмотки якоря и собственно на бандаж.

При бандаже из проволоки число витков бандажа

$$w_б = 11{,}3\,\frac{9{,}81 G_0 (D_2 - h_{z2})}{\sigma d^2}\left(\frac{1{,}2 n_{max}}{1000}\right)^2, \qquad (11.4)$$

где G_0 — масса обмотки якоря, кг; n_{max} — максимальная частота вращения якоря, об/мин; σ — допускаемое напряжение растяжения, для проволоки $\sigma = 400$ МПа; d — диаметр проволоки, принимают в зависимости от высоты оси вращения машины:

h, мм	200	225	250—280	315
d, мм	0,5—0,8	1,0	1,5	2,0

При расчете бандажа для лобовой части обмотки в (11.4) подставляют вместо G_0 массу одной лобовой части обмотки, кг:

$$G_{о.л} \approx 7{,}5 \cdot 10^{-6} q_{эл} N_{эл} Z_2 \tau, \qquad (11.5)$$

где $q_{эл}$ — площадь поперечного сечения элементарного проводника обмотки якоря, мм²; $N_{эл}$ — число элементарных проводников в одном пазу якоря.

При расчете бандажа для пазовой части обмотки якоря в (11.4) вместо G_0 подставляют массу проводников и изоляции пазовой части обмотки, кг:

$$G_{о.п} = [8{,}9 q_{эл} N_{эл} + 2{,}5 (b_п h_{z2} - q_{эл} N_{эл})]\, Z_2 l_2 \cdot 10^{-6}. \qquad (11.6)$$

Число витков проволочного бандажа в одной кольцевой канавке якоря

$$w_{б.к} = [(l_б - 0{,}2)/d] - 1, \qquad (11.7)$$

где $l_б$ — длина кольцевой канавки, мм.

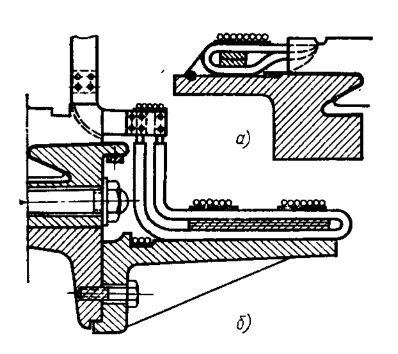


Рис. 11.7. Уравнительные соедииеиия:

а — с наружной стороны коллектора; *б* — с внутренней стороны коллектора

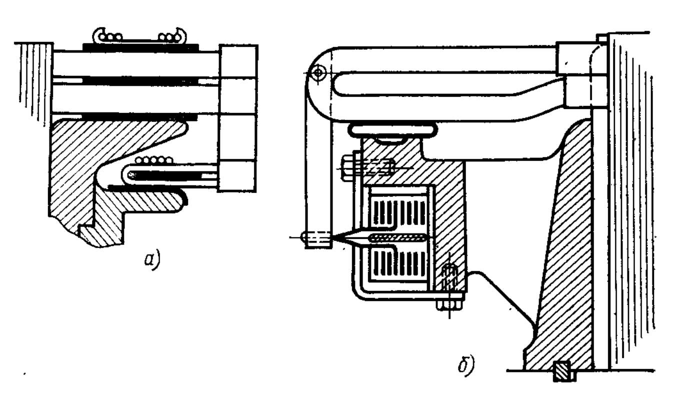


Рис. 11.8. Уравнительные соединения со стороны, противоположной коллектору:

а — в виде вилок; *б* — в виде колец

При расчете бандажа из стеклоленты в (11.4) следует вместо коэффициента 11,3 подставить коэффициент 9,0, а в знаменателе вместо d^2 подставить $q_л$ — площадь поперечного сечения ленты, мм².

Допустимое напряжение растяжения стеклоленты принимают для стеклоленты класса нагревостойкости В $\sigma = 150$ МПа, для стеклоленты классов нагревостойкости F и H $\sigma = 130$ МПа.

Для бандажа используется стеклолента марки ЛСБ толщиной от 0,18 до 0,2 мм и шириной 10, 15, 20, 25, 30 мм.

Уравнительные соединения. В машинах постоянного тока с простыми петлевыми обмотками применяются уравнительные соедине-

ния первого рода, в машинах со сложными петлевыми обмотками — первого и второго родов, а в машинах со сложными волновыми обмотками — второго рода. Размещают уравнительные соединения либо со стороны коллектора, впаивая их в коллекторные пластины, либо со стороны, противоположной коллектору. Уравнительные соединения со стороны коллектора выполняют в виде вилок, располагаемых с наружной или внутренней стороны коллектора (рис. 11.7, *а*, *б*). Уравнительные соединения со стороны, противоположной коллектору, могут быть выполнены также в виде вилок (рис. 11.8, *а*) или в виде колец (рис. 11.8, *б*).

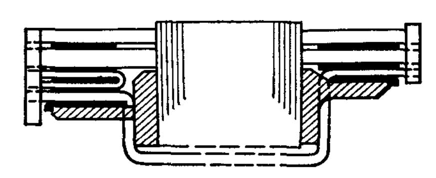


Рис. 11.9. Уравнители второго рода

Уравнительные соединения выполняют медным обмоточным проводом сечением, мм²,

$$q_{\text{ур}} = (0{,}2 \div 0{,}3)\, q_{\text{эф}2}, \qquad (11.8)$$

где $q_{\text{эф}2}$ — сечение эффективного проводника обмотки якоря, мм².

В сложных петлевых обмотках точки одинакового потенциала простых обмоток, образующих сложную обмотку, расположены по разным сторонам якоря. Для соединения этих точек применяют уравнительные соединения, проходящие под сердечником якоря (рис. 11.9).

11.3. КОЛЛЕКТОР

Коллектор представляет собой сборочную единицу цилиндрической формы, состоящую из большого числа медных пластин трапецеидального сечения и изоляционных миканитовых прокладок. Различают несколько конструктивных разновидностей коллекторов. Наибольшее применение получили две конструкции — коллектор на пластмассе и коллектор с нажимными конусными фланцами (шайбами).

Коллекторы на пластмассе (рис. 11.10) применяют в машинах небольшой мощности при диаметре коллектора не более 200—250 мм. Пластмасса в этих коллекторах скрепляет набор медных пластин и миканитовых прокладок. Для этой цели обычно используют пластмассу марок К6 или АГ-4с. Пластмасса запрессовывается в пространство между набором пластин и стальной втулкой. В некоторых конструкциях для увеличения прочности коллектора эту пластмассу армируют стальными кольцами. В этом случае миканитовые прокладки в нижней части делают несколько большими, чем медные пластины. Эта мера исключает возможность замыкания медных пластин армировочными кольцами. Недостатком коллектора на пластмассе является возможность прогорания пластмассы на стыке с медью на внешнем торце коллектора при наличии в этих местах зазоров, в которые попадает смазка и в которых оседает угольная пыль. Кроме того, в коллекторах на пластмассе затруднено охлаждение корпуса из-за низкой теплопроводности пластмассы.

Коллекторы с нажимными конусными фланцами (шайбами) имеют более прочную конструкцию, однако стоимость этих коллекторов выше, чем коллекторов на пластмассе. Набор медных пластин и миканитовых прокладок удерживается в таком коллекторе силами арочного распора, возникающими при давлении конусной части фланцев на ласточкин хвост пластин.

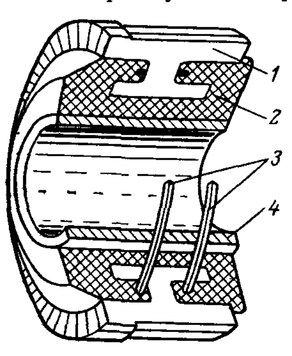
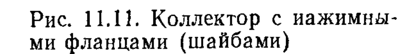


Рис. 11.10. Коллектор на пластмассе:

1 — медная пластина; *2* — пластмасса; *3* — армировочное кольцо; *4* — стальная втулка



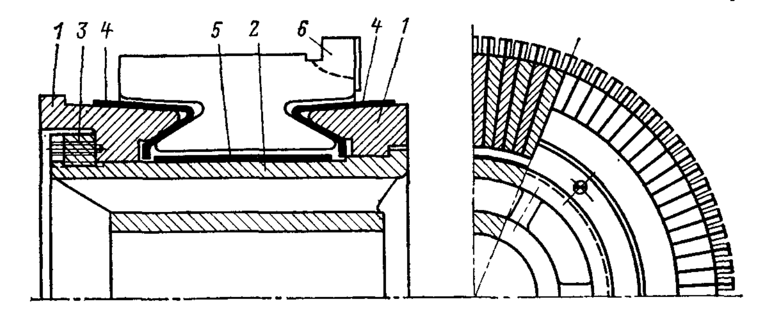


Рис. 11.11. Коллектор с нажимными фланцами (шайбами)

Устройство коллектора с нажимными фланцами (шайбами) показано на рис. 11.11. Нажимные фланцы *1*, надетые на втулку *2*, стянуты кольцевой гайкой *3*. Коллекторные пластины изолируются от втулки *2* миканитовым цилиндром *5*, а от конусных фланцев — миканитовыми манжетами *4*. Для присоединения коллекторных пластин к секциям обмотки якоря каждая пластина имеет выступающую часть с продольным пазом, называемую петушком *6*. В паз закладывают и затем пропаивают концы секций обмотки якоря.

Рассмотренная конструкция коллектора с кольцевой гайкой применяется лишь при сравнительно небольшой длине коллектора. Более прочной и надежной является конструкция коллектора с затяжкой конусных фланцев стальными шпильками или болтами

(рис. 11.12, а, б). Количество таких шпилек (болтов) $N_ш$ принимают в зависимости от диаметра коллектора: при диаметре коллектора до 500 мм $N_ш=6\div12$; при диаметре коллектора от 500 до 1000 мм $N_ш=14\div22$. Диаметр шпилек рекомендуется брать не менее 16 мм. Для лучшего охлаждения в стальной или чугунной втулке иногда делают вентиляционные каналы.

Коллектор состоит из большого числа деталей разной конфигурации, изготовленных из материалов с различными физическими свойствами. Это обстоятельство делает механический расчет коллектора весьма сложным и к тому же ориентировочным.

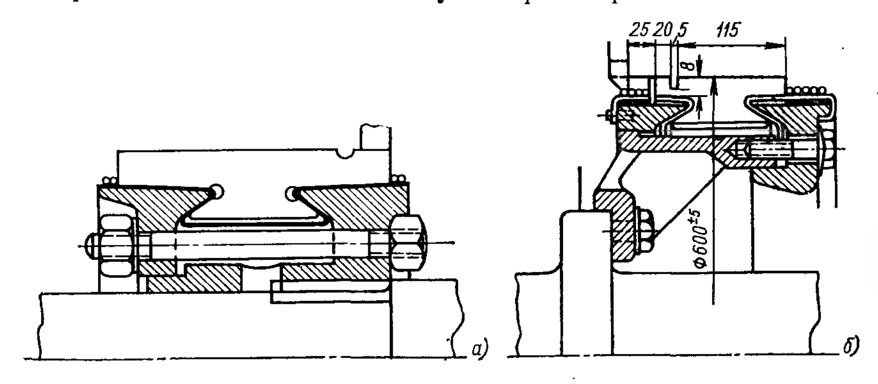


Рис. 11.12. Коллекторы со стяжными шпильками (*а*) и стяжными болтами (*б*)

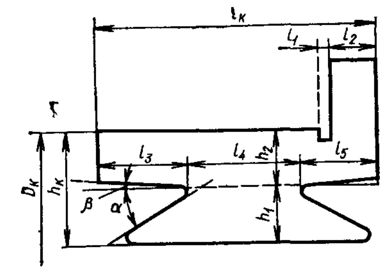


Рис. 11.13. Коллекторная пластина

На основании опыта проектирования современных серий машин постоянного тока выработаны рекомендации для определения размеров, мм, коллекторной пластины (рис. 11.13):

высота пластины

$$h_к \approx (0{,}8 \div 1{,}15)\sqrt{D_к}; \tag{11.9}$$

высота ласточкина хвоста

$$h_1 \approx (0{,}5 \div 0{,}55)\,h_к; \tag{11.10}$$

длина средней части ласточкина хвоста

$$l_4 = (1{,}2 \div 1{,}6)\,h_1; \tag{11.11}$$

крайние части ласточкина хвоста должны иметь неодинаковую длину ($l_3>l_5$), что способствует более равномерному распределению центробежных сил между пластинами.

В приведенных выше формулах меньшие значения $h_к$ и h_1 соответствуют окружной скорости коллектора $v_к\leqslant30$ м/с, а большие — $v_к=40\div50$ м/с.

Выточку $l_1=6\div8$ мм делают по технологическим соображениям — для вывода шлифовального круга при обработке рабочей поверхности коллектора, а также для выхода фрезы при продорожке миканита между пластинами коллектора.

Размер l_2 принимают равным 12—15 мм при многовитковых секциях или 15—20 мм при одновитковых секциях обмотки якоря.

Углы α и β, определяющие профиль ласточкина хвоста, обычно принимают: при $D_к\leqslant150$ мм $\alpha=45°$, $\beta=3°$; при $D_к>150$ мм $\alpha=30°$, $\beta=3°$.

Толщина миканитовых манжет равна 1—1,5 мм, а миканитового цилиндра 0,75—1,0 мм.

11.4. ВАЛ И ПОДШИПНИКИ

Вал машины постоянного тока, так же как и других машин, подвержен действию момента кручения и изгибающего момента от силы тяжести насаженных на вал деталей, силы магнитного тяжения, центробежных сил небаланса и т. п.

Расчет вала машины постоянного тока ведут по формулам, приведенным в § 7.4, со следующими уточнениями:

1) при определении прогиба вала под серединой сердечника якоря от силы тяжести насаженных на вал деталей следует учитывать силу тяжести коллектора, т. е.

$$F_2' = F_2 + 0{,}85F_к, \tag{11.12}$$

где F_2 — сила тяжести якоря, Н, определяемая по (7.8); $F_к$ — сила тяжести коллектора, Н:

$$F_к = 60D_к^2\, l_к \cdot 10^{-6}, \tag{11.13}$$

где $D_к$ и $l_к$ — наружный диаметр коллектора (по рабочей поверхности пластин) и его активная длина, мм;

2) при расчете начальной силы одностороннего магнитного тяжения по (7.18) следует принять следующие значения коэффициента k_F: при $2p=2$ $k_F=0{,}13$; при $2p=4$ и более $k_F=0{,}20$.

При конструировании вала следует стремиться к минимальному числу ступеней. Для машин постоянного тока с высотой оси вращения $h\leqslant315$ мм принимают выступающий конец вала цилиндрической формы, а для машин с $h>315$ мм возможно применение выступающего конца вала конической формы. При этом некоторые конструкции машин могут иметь два выступающих конца вала конической формы. В случае повреждения одного конца вала возможна дальнейшая эксплуатация машины с использованием другого конца вала.

Вал машины обычно имеет упорный выступ для фиксации положения сердечника якоря. Высоту такого выступа принимают не менее, мм,

$$h_в = 0{,}01D_2 + 1. \qquad (11.14)$$

В местах посадки на вал сердечника якоря, коллектора и вентилятора, а также на выступающих концах вала предусматриваются шпоночные пазы.

В машинах постоянного тока общего назначения с высотой оси вращения до 500 мм применяют подшипники качения. Расчет требуемых параметров и выбор этих подшипников выполняют в порядке, указанном в § 7.6. При этом коэффициент $k_н$, учитывающий характер нагрузки, в формулах (7.31)—(7.35) следует принять равным для машин с $h<315$ мм $k_н=2{,}0$; для машин с $h\geqslant315$ мм $k_н=2{,}5$.

11.5. ТОКОСЪЕМНОЕ УСТРОЙСТВО

Токосъемное устройство машины постоянного тока состоит из щеток и щеткодержателей, бракетов и траверс.

Щетки для электрических машин прессуют из угольных и графитных порошков. Марки щеток и их свойства приведены в

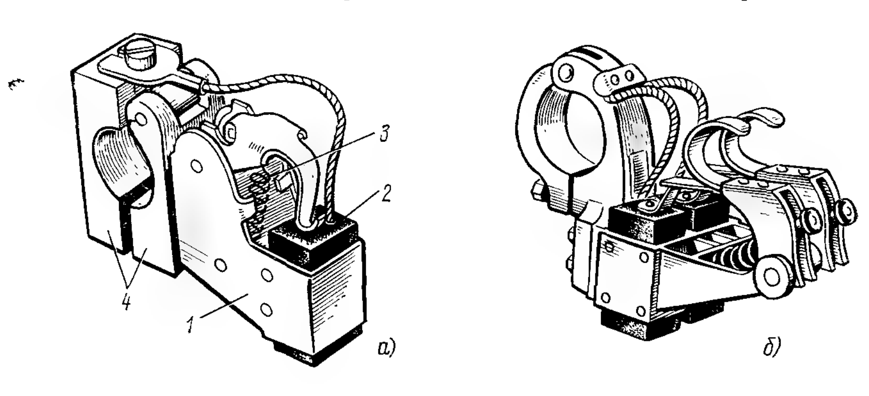


Рис. 11.14. Щеткодержатели радиального типа:
а — одинарный; б — сдвоенный

табл. 2.2. Каждая щетка обычно снабжается гибким плетеным канатиком с припаянным наконечником, посредством которого щетка присоединяется к неподвижной части щеткодержателя.

Щеткодержатели, применяемые в машинах постоянного тока, разделяются на два основных вида — радиальные и наклонные (реактивные).

Наибольшее применение получили радиальные щеткодержатели (рис. 11.14, *а*), в которых ось щетки расположена перпендикулярно поверхности коллектора, т. е. радиально. В латунную обойму

1 вставляется щетка *2*, пружина *3* осуществляет давление на щетку, прижимая ее к коллектору. Щеткодержатель закрепляют на щеточном пальце посредством зажима *4*. Применяются также щеткодержатели сдвоенного типа (рис. 11.14, *б*). Достоинство радиальных щеткодержателей состоит в том, что их можно применять в реверсивных машинах, так как условия работы таких щеткодержателей не зависят от направления вращения коллектора.

Наклонные (реактивные) щеткодержатели (рис. 11.15, *а*) применяют только в машинах одностороннего вращения — обычно в генераторах. Эти щеткодержатели обеспечивают лучшие условия

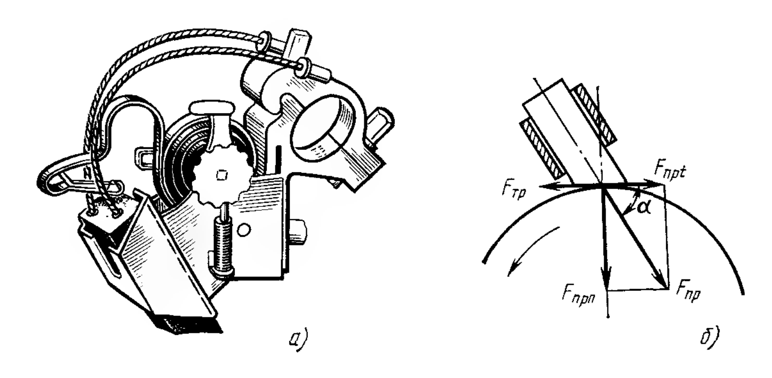


Рис. 11.15. Щеткодержатель наклонного типа (реактивный)

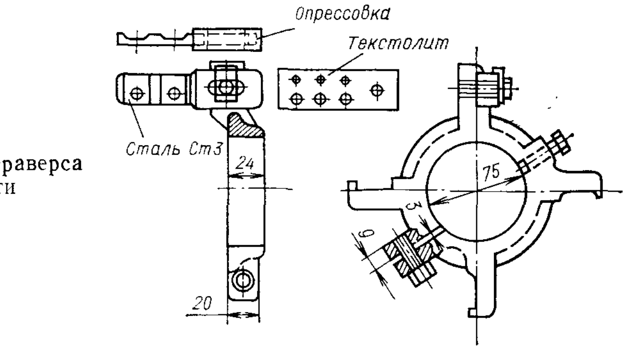


Рис. 11.16. Щеточная траверса машины малой мощности

работы щеточного контакта, так как при определенном усилии пружины $F_{пр}$ (рис. 11.15, *б*) можно подобрать такой угол наклона щетки α, при котором сила трения щетки о коллектор $F_{тр}$ уравновешивается касательной составляющей усилия пружины $F_{прt}$ и щетка не будет прижата к стенке щеткодержателя, а сила $F_{прn}$ будет равномерно прижимать щетку к коллектору.

Для обеспечения плавного перемещения щетки в щеткодержателе необходим зазор от 0,1 до 0,3 мм между стенками обоймы и щеткой.

В машинах малой мощности щеткодержатели крепят на пальцах круглого или прямоугольного сечения. Число щеточных пальцев равно числу главных полюсов в машине. Пальцы закрепляют на траверсе и изолируют от нее миканитовыми втулками или же опрессовывают пластмассой в местах крепления.

На рис. 11.16 показана щеточная траверса машины небольшой мощности. Траверса сделана неразъемной, но в ней предусмотрена прорезь, стягиваемая болтом для фиксации траверсы на опорной поверхности — на заточке подшипникового щита. В более крупных машинах траверсу делают из двух полуколец, соединяемых болтами. В некоторых конструкциях машин постоянного тока с высотой оси вращения $h=355\div500$ мм применяют крепление щеточных пальцев непосредственно к подшипниковому щиту.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ П.1

ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

Таблица П.1.1. **Диаметры и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155**

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²
0,08	0,10	0,00502	(0,53)	0,585	0,221
0,09	0,11	0,00636	0,56	0,615	0,246
0,10	0,122	0,00785	0,60	0,655	0,283
0,112	0,134	0,00985	0,63	0,69	0,312
0,125	0,147	0,01227	(0,67)	0,73	0,353
(0,132)	0,154	0,01368	0,71	0,77	0,396
0,14	0,162	0,01539	0,75	0,815	0,442
0,15	0,18	0,01767	0,80	0,865	0,503
0,16	0,19	0,0201	0,85	0,915	0,567
0,17	0,20	0,0227	0,90	0,965	0,636
0,18	0,21	0,0255	0,95	1,015	0,709
(0,19)	0,22	0,0284	1,00	1,08	0,785
0,20	0,23	0,0314	1,06	1,14	0,883
(0,212)	0,242	0,0353	1,12	1,20	0,985
0,224	0,259	0,0394	1,18	1,26	1,094
(0,236)	0,271	0,0437	1,25	1,33	1,227
0,25	0,285	0,0491	1,32	1,405	1,368
(0,265)	0,300	0,0552	1,40	1,485	1,539
0,28	0,315	0,0616	1,50	1,585	1,767
(0,30)	0,335	0,0707	1,60	1,685	2,011
0,315	0,350	0,0779	1,70	1,785	2,27
0,335	0,370	0,0881	1,80	1,895	2,54
0,355	0,395	0,0099	1,90	1,995	2,83
0,375	0,415	0,1104	2,00	2,095	3,14
0,40	0,44	0,1257	2,12	2,22	3,53
0,425	0,465	0,1419	2,24	2,34	3,94
0,45	0,49	0,1590	2,36	2,16	4,36
(0,475)	0,515	0,1772	2,50	2,60	4,91
0,50	0,545	0,1963			

Примечания: 1. Провода, размеры которых указаны в скобках, следует применять только в отдельных случаях при обосновании технико-экономической целесообразности.

2. Среднее значение диаметра изолированного провода вычислено с учетом расчетной средней двусторонней толщины эмалевой изоляции, принимаемой как округленное среднеарифметическое из минимальной и максимальной толщины.

Таблица П.1.2. **Размеры и площади поперечного сечения прямоугольной проволоки**

Номинальный размер проволоки по большей стороне *b*, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне *a*, мм: 0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12
	Расчетное сечение проволоки, мм²																	
2,00	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,585	—	—	—	—	—	—	—
2,12	1,559	—	1,734	—	1,905	—	2,160	—	2,435	—	2,753	—	—	—	—	—	—	—
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,160	2,294	2,429	2,585	2,742	2,921	3,145	3,369	—	—	—	—	—
2,36	1,751	—	1,950	—	2,145	—	2,429	—	2,735	—	3,089	—	3,561	—	—	—	—	—
2,50	1,863	1,970	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,910	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	—	—	—
2,65	1,983	—	2,211	—	2,435	—	2,753	—	3,098	—	3,495	—	4,025	—	4,407	—	—	—
2,80	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	—
3,00	2,263	—	2,526	—	2,785	—	3,145	—	3,535	—	3,985	—	4,585	—	5,038	—	5,638	—
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,510	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,35	2,543	—	2,841	—	3,135	—	3,537	—	3,973	—	4,475	—	5,145	—	5,667	—	6,337	—
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,110	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163
3,75	2,863	—	3,201	—	3,535	—	3,985	—	4,473	—	5,035	—	5,785	—	6,387	—	7,137	—
4,00	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117
4,25	3,263	—	3,651	—	4,035	—	4,545	—	5,098	—	5,735	—	6,585	—	7,287	—	8,137	—
4,50	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,410	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177
4,75	3,663	—	4,101	—	4,535	—	5,105	—	5,723	—	6,435	—	7,385	—	8,188	—	9,137	—
5,00	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
5,30	4,103	—	4,596	—	5,085	—	5,721	—	6,410	—	7,205	—	8,265	—	9,177	—	10,24	—
5,60	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	7,177	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51
6,00	4,663	—	5,226	—	5,785	—	6,505	—	7,285	—	8,185	—	9,385	—	10,44	—	11,64	—
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,660	8,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99
6,70	—	—	5,856	—	6,485	—	7,289	—	8,160	—	9,165	—	10,510	—	11,70	—	13,04	—
7,10	—	—	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,660	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69
7,50	—	—	—	—	7,285	—	8,185	—	9,160	—	10,29	—	11,79	—	13,14	—	14,64	—
8,00	—	—	—	—	7,785	8,265	8,745	9,225	9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60
8,50	—	—	—	—	—	—	9,305	—	10,41	—	11,69	—	13,39	—	14,94	—	16,64	—
9,00	—	—	—	—	—	—	9,865	10,410	11,04	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
9,50	—	—	—	—	—	—	—	—	11,66	—	13,09	—	14,99	—	16,74	—	18,64	—
10,0	—	—	—	—	—	—	—	—	12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84
10,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14,63	—	16,75	—	18,72	—	20,84	—
11,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,47	16,59	17,71	18,68	19,80	20,92	22,04	23,38
11,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,67	—	20,88	—	23,24	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14

Продолжение табл. П.1.2

Номинальный размер проволоки по большей стороне *b*, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне *a*, мм: 2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60
	Расчетное сечение проволоки, мм²																
2,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. П.1.2

Номинальный размер проволоки по большой стороне *b* мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне *a*, мм																
	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60
	Расчетное сечение проволоки, мм²																
2,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,15	6,693	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,35	7,141	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,55	7,589	7,829	8,326	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,75	8,037	—	8,826	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,00	8,597	8,891	9,451	10,65	10,85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,25	9,157	—	10,08	—	11,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,50	9,717	10,07	10,70	11,38	12,05	12,95	13,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,75	10,28	—	11,33	—	12,75	—	14,41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,00	10,84	11,25	11,95	12,70	13,45	14,45	15,20	16,20	17,20	—	—	—	—	—	—	—	—
5,30	11,51	—	12,70	—	14,29	—	16,15	—	18,27	—	—	—	—	—	—	—	—
5,60	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33	20,14	21,54	—	—	—	—	—	—
6,00	13,08	—	14,45	—	16,25	—	18,35	—	20,75	—	23,14	—	—	—	—	—	—
6,30	13,75	14,32	15,20	16,15	17,09	18,35	19,30	20,56	21,82	22,77	24,34	25,92	27,49	—	—	—	—
6,70	14,65	—	16,20	—	18,21	—	20,56	—	23,24	—	25,94	—	29,29	—	—	—	—
7,10	15,54	16,21	17,20	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	—	—
7,50	16,44	—	18,20	—	20,45	—	23,08	—	26,08	—	29,14	—	32,89	—	36,64	—	—
8,00	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
8,50	18,68	—	20,70	—	23,25	—	26,23	—	29,63	—	33,14	—	37,39	—	41,64	—	46,74
9,00	19,80	20,69	21,95	23,30	24,65	26,54	27,80	29,60	31,40	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,50	20,92	—	23,20	—	26,05	—	29,38	—	33,18	—	37,14	—	41,89	—	46,64	—	52,34
10,0	22,04	23,05	23,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,8	23,38	—	25,95	—	29,13	—	32,84	—	37,08	—	41,54	—	46,84	—	52,14	—	58,50
11,2	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21	41,14	43,94	46,74	49,54	52,34	55,14	58,50	61,86
11,8	26,07	—	28,95	—	32,49	—	36,62	—	41,34	—	46,34	—	52,24	—	52,14	—	65,22
12,5	27,64	24,95	30,70	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

Продолжение табл. П.1.2

Номинальный размер проволоки по большей стороне *b*, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей строке *a*, мм												
	3,28	3,35	3,53	3,55	3,75	3,80	4,00	4,10	4,25	4,40	4,50	4,70	4,75
	Расчетное сечение проволоки, мм²												
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,2	—	36,97	—	39,21	41,14	—	43,94	—	46,74	—	49,54	—	52,34
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,8	—	—	—	41,34	—	—	46,34	—	—	—	52,24	—	—
12,5	—	41,33	—	43,83	46,02	—	49,14	—	52,27	—	55,39	—	58,52
13,2	—	—	—	46,31	—	—	51,94	—	—	—	58,54	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14,0	—	46,35	—	49,15	51,95	—	55,14	—	58,64	—	62,14	—	65,64
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15,0	—	—	—	52,70	—	—	59,14	—	—	—	66,64	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,0	—	53,05	—	56,25	59,14	—	63,14	—	67,14	—	71,14	—	75,14
16,8	54,62	—	58,82	—	—	63,36	—	68,02	—	73,06	—	78,10	—
18,0	58,56	—	63,06	—	—	67,92	—	72,94	—	78,34	—	83,74	—
19,5	63,48	—	68,35	—	—	73,62	—	79,09	—	84,94	—	90,79	—
20,0	—	—	—	—	—	—	79,52	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. П.1.2

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм												
	3,28	3,35	3,53	3,55	3,75	3,80	4,00	4,10	4,25	4,40	4,50	4,70	4,75
	Расчетное сечение проволоки, мм²												
22,0	71,68	—	77,18	—	—	83,12	—	89,34	—	95,94	—	102,54	—
25,0	81,52	—	87,77	—	—	94,52	99,52	101,64	—	109,14	—	116,40	—
26,3	—	—	92,36	—	—	99,46	—	106,97	—	114,86	—	122,75	—
28,0	—	—	—	—	—	105,92	111,94	113,94	—	122,34	—	130,74	—
30,0	—	—	—	—	—	113,52	119,52	122,14	—	131,14	—	140,14	—
32,0	—	—	—	—	—	—	—	130,34	—	139,94	—	149,54	—
35,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	153,14	—	163,64	—

Продолжение табл. П.1.2

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм												
	5,00	5,10	5,30	5,50	5,60	6,00	6,50	7,00	8,00	9,00	10,0	11,0	12,5
	Расчетное сечение проволоки, мм²												
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	96,34	—	—	—
11,2	55,14	—	58,50	—	61,86	—	—	—	—	—	—	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	103,54	—	—	—
11,8	58,14	—	—	—	65,22	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	61,64	—	65,39	—	69,14	—	—	—	99,14	111,64	124,14	136,66	155,41
13,2	65,14	—	—	—	73,06	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—	—	93,64	107,14	120,64	—	—	—
14,0	69,14	—	73,34	—	77,54	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	—	—	—	—	—	—	93,39	100,64	115,14	129,64	—	—	—
15,0	74,14	—	—	—	83,14	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	100,54	108,34	123,94	139,54	154,14	—	—
16,0	79,14	—	83,94	—	88,74	95,14	—	—	127,14	—	—	—	—
16,8	—	84,82	—	91,54	—	99,94	108,34	116,74	133,54	—	—	—	—
18,0	—	90,94	—	98,14	—	107,14	116,14	125,14	143,14	—	—	—	—
19,5	—	98,59	—	106,39	—	116,14	125,89	135,64	155,14	—	—	—	—
20,0	99,14	—	—	—	—	119,14	—	—	159,14	—	—	—	—
22,0	—	111,34	—	120,14	—	131,14	142,14	153,14	—	—	—	—	—
25,0	124,14	126,64	—	136,64	—	149,14	161,64	174,14	—	—	—	—	—
26,3	—	133,27	—	143,79	—	158,94	170,09	183,24	—	—	—	—	—
28,0	—	141,94	—	153,14	—	167,14	181,14	195,14	—	—	—	—	—
30,0	149,14	152,14	—	164,14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32,0	—	162,34	—	175,14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечания: 1. Проволока с размерами, расположенными в пределах, ограниченных сверху и снизу линией ———, может поставляться для изготовления обмоточного провода марок ПЭТВП и ПЭТП-155 с нагревостойкой высокопрочной эмалевой изоляцией.

2. Проволока с размерами, расположенными в пределах, ограниченных линией ———, может поставляться для изготовления обмоточного провода марок ПСД и ПСДК с изоляцией из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким или кремнийорганическим лаком.

3. Проволока с размерами, расположенными в пределах, ограниченных линией — — — — —, может поставляться для изготовления обмоточного провода марки ПСДКТ с утоненной изоляцией из бесщелочного стекловолокна и пропиткой кремнийорганическим лаком.

Таблица П.1.3. Номинальные размеры, мм, и расчетные сечения, мм², шин

b, мм	a, мм																	
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7	8	9	10	11	12,5	14	16	18	20	25	30
16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	175,1	199,1	233,1	255,1	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	199,1	219,1	249,1	279,1	319,1	359,1	399,1	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	199,1	224,1	249,1	274,1	311,6	349,1	399,1	449,1	499,1	624,1	—
30	—	—	—	—	179,1	194,1	209,1	239,1	269,1	299,1	329,1	374,1	419,1	479,1	539,1	599,1	749,1	899,1
32	—	—	—	—	191,1	207,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35	—	—	174,1	191,6	209,1	226,6	—	279,1	—	349,1	—	436,6	—	—	—	699,1	—	—
40	159,5	179,1	199,1	219,1	239,1	259,1	279,1	319,1	359,1	399,1	439,1	499,1	559,1	639,1	719,1	799,1	999,1	1199,1
45	179,5	201,6	224,1	246,6	269,1	291,6	314,1	359,1	404,1	449,1	494,1	561,6	629,1	719,1	809,1	899,1	—	1349,1
50	199,5	224,1	249,1	274,1	299,1	324,1	349,1	399,1	449,1	499,1	549,1	624,1	699,1	799,1	899,1	999,1	—	—
55	219,5	246,6	274,1	301,6	329,1	356,6	384,1	429,1	494,1	549,1	—	686,6	—	879,1	—	1099,1	—	—
60	239,5	269,1	299,1	329,1	359,1	389,1	439,1	479,1	539,1	599,1	—	749,1	—	959,1	—	1199,1	—	—
65	259,5	291,6	324,1	—	389,1	—	454,1	—	584,1	649,1	—	811,6	—	1039,1	—	—	—	—
70	279,5	314,1	349,1	—	—	—	—	559,1	629,1	699,1	—	874,1	—	1119,1	—	—	—	—
75	—	—	—	—	—	—	—	599,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	319,5	359,1	399,1	—	479,1	—	559,1	639,1	—	799,1	—	999,1	—	—	—	—	—	—
90	359,5	404,1	449,1	—	539,1	—	629,1	719,1	—	899,1	—	1124,1	—	—	—	—	—	—
100	399,5	449,1	499,1	—	599,1	—	699,1	799,1	—	999,1	—	1249,1	—	—	—	—	—	—
120	—	—	—	—	—	—	—	959,1	—	1199,1	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Расчетные сечения указаны с учетом закругления углов.

Таблица П.1.4. **Максимальные размеры провода ПЭТВСД**

b, мм	$b_{из}$, мм		$a_{из}$, мм при номинальном размере a, мм											
	0,9—2,0	2,12—3,55	0,9	1,0	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
2,80	3,26	—	—	1,54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,15	3,61	—	—	—	—	—	—	—	—	1,96	2,06	2,16	—	2,35
4,50	4,96	5,02	—	—	—	—	—	—	—	—	2,06	2,16	—	2,36
4,75	5,21	5,27	—	1,58	—	1,70	—	1,83	—	1,98	—	2,18	—	2,38
5,0	5,46	5,52	—	1,58	—	1,70	—	1,83	1,90	1,98	2,08	2,18	2,28	2,38
5,6	6,06	6,12	—	1,58	—	1,70	—	1,83	1,90	1,98	2,08	2,18	2,28	2,38
6,0	6,46	6,52	—	1,60	—	1,72	—	1,85	—	2,00	—	2,20	—	2,40
6,3	6,78	6,84	—	—	—	—	—	—	1,92	—	—	2,20	2,22	2,40
7,1	7,58	7,64	1,32	1,60	1,66	1,72	1,78	1,85	1,92	2,00	2,10	2,2	2,30	2,40
7,5	7,98	8,04	—	1,62	—	1,74	—	1,87	—	2,02	—	2,22	—	2,42
8,0	8,48	8,54	—	—	—	—	1,8	1,87	1,94	2,02	2,12	2,22	2,32	2,42

b, мм	$b_{из}$, мм		$a_{из}$, мм при номинальном размере a, мм											
	0,9—2,0	2,12—3,55	1,9	2,0	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65	2,8	3,0	3,15	3,35	3,55
3,15	3,61	—	—	2,56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,50	4,96	5,02	2,46	2,56	2,68	—	—	3,06	—	—	—	—	—	—
4,75	5,21	5,27	—	2,58	—	2,83	—	3,09	—	3,39	—	—	—	—
5,0	5,46	5,52	2,48	2,58	2,70	2,83	—	3,09	3,24	3,39	3,61	—	—	—
5,6	6,06	6,12	2,48	2,58	2,70	2,83	—	3,09	3,24	3,39	3,61	—	—	—
6,0	6,46	6,52	—	2,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6,3	6,78	6,84	—	—	2,72	2,85	2,97	3,11	3,26	3,41	—	3,78	—	—
6,7	7,18	7,24	—	—	—	—	—	3,11	—	—	—	—	—	4,18
7,1	7,58	7,64	2,5	2,6	2,72	2,85	2,97	3,11	3,26	3,41	3,68	3,78	3,98	—
7,5	7,98	8,04	—	2,62	—	2,87	—	3,13	—	3,43	—	3,80	—	—
8,0	8,48	8,54	2,52	2,62	2,74	2,87	2,99	3,13	3,28	3,43	3,65	3,80	—	—

ТАБЛИЦЫ И КРИВЫЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ

Таблица П.2.1. **Основная таблица намагничивания**

Сталь 2013

B, Тл	H, А/м: 0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	105	107	108
1,0	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,5	620	670	780	890	1000	1130	1240	1350	1460	1580
1,6	1700	1860	2020	2180	2340	2500	2700	2800	3000	3200
1,7	3400	3700	4000	4300	4700	5000	5400	5800	6200	6600
1,8	7000	7500	8000	8500	9200	10 000	10 600	11 200	11 800	12 400
1,9	13 000	13 600	14 200	14 800	15 600	16 500	17 300	18 100	18 900	19 800
2,0	20 700	22 600	24 400	26 300	28 100	30 000	36 000	42 000	48 000	54 000
2,1	60 000	67 000	74 000	81 000	88 000	95 000	102 000	109 000	116 000	123 000
2,2	130 000	138 000	146 000	154 000	162 000	170 000	178 000	186 000	194 000	202 000
2,3	210 000	218 000	226 000	234 000	242 000	250 000	258 000	266 000	274 000	282 000
2,4	290 000	298 000	306 000	314 000	322 000	330 000	338 000	346 000	354 000	362 000

Таблица П.2.2. **Таблица намагничивания для спинки асинхронных двигателей**

Сталь 2013

B, Тл	H, А/м: 0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1,0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2,0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Таблица П.2.3. **Таблица намагничивания для зубцов асинхронных двигателей**

Сталь 2013

B, Тл	H,А/м: 0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2150	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	10 460	10 980	11 500	12 000	12 600	13 200	13 800
2,3	14 400	15 100	15 800	16 500	17 200	18 000	18 800	19 600	20 500	21 400

Т а б л и ц а П.2.4. **Основная таблица намагничивания**

С т а л ь м а р о к 2211 и 2312

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	68	69	70	71	72	73	73	74	75	75
0,5	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
0,6	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
0,7	96	99	103	108	113	118	122	126	131	135
0,8	140	145	150	155	160	165	170	175	180	186
0,9	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235
1,0	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294
1,1	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
1,2	400	410	420	430	440	460	470	480	500	520
1,3	550	580	610	650	690	730	780	830	880	940
1,4	1000	1060	1120	1180	1240	1300	1360	1420	1480	1540
1,5	1600	1750	1900	2050	2200	2350	2500	2700	2900	3100
1,6	3400	3600	3800	4100	4400	4700	5300	5900	6500	7100
1,7	7700	8200	8900	9400	10 000	10 600	11 100	11 700	12 200	12 800
1,8	13 400	14 000	14 600	15 200	15 800	16 400	17 000	17 600	18 200	18 800
1,9	19 400	20 000	21 800	23 700	25 700	27 800	30 000	32 200	34 400	36 600
2,0	38 800	41 000	43 200	45 400	47 600	49 800	52 000	54 500	57 500	60 500
2,1	65 600	72 500	80 000	88 000	96 000	104 000	112 000	120 000	128 000	136 000
2,2	144 000	152 000	160 000	168 000	176 000	184 000	192 000	200 000	208 000	216 000
2,3	224 000	232 000	240 000	248 000	256 000	264 000	272 000	280 000	288 000	296 000
2,4	304 000	312 000	320 000	328 000	336 000	344 000	352 000	360 000	368 000	376 000

Т а б л и ц а П.2.5. **Таблица намагничивания для спинки асинхронных двигателей**

С т а л ь м а р о к 2211 и 2312

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	89	91	93	94	96	98	100	102	104	106
0,5	108	110	113	115	118	120	122	124	126	128
0,6	131	134	136	139	141	144	147	150	153	156
0,7	159	162	166	169	172	176	180	183	186	190
0,8	194	198	201	204	208	212	216	220	223	227
0,9	231	235	239	243	248	252	255	260	265	269
1,0	274	279	284	289	295	300	305	311	318	323
1,1	332	338	344	351	357	367	374	382	390	398
1,2	410	418	426	435	444	455	466	475	487	498
1,3	509	521	533	546	558	572	585	600	618	635
1,4	656	675	695	717	740	763	789	815	843	870
1,5	905	934	965	1000	1040	1090	1130	1190	1240	1290
1,6	1370	1440	1520	1590	1660	1720	1820	1910	2010	2100
1,7	2180	2310	2410	2550	2610	2720	2840	2980	3130	3290
1,8	3460	3630	3800	3970	4140	4300	4490	4670	4850	5040
1,9	5220	5600	6000	6400	6900	7400	7900	8500	9100	9700
2,0	10 400	11 100	11 800	12 500	13 300	14 100	14 900	15 800	16 700	17 600

Т а б л и ц а П.2.6. **Таблица намагничивания для зубцов асинхронных двигателей**

С т а л ь м а р о к 2211 и 2312

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	171
0,5	174	177	180	184	186	190	192	196	198	202
0,6	204	209	213	216	221	224	229	233	237	241
0,7	245	249	253	257	262	267	272	277	282	287
0,8	292	297	302	306	311	316	322	326	331	337
0,9	342	347	353	360	366	372	379	384	390	396
1,0	403	409	417	425	433	440	450	460	470	477
1,1	488	497	509	517	527	537	517	559	570	582
1,2	593	602	613	626	638	651	663	677	695	710
1,3	724	738	755	770	790	804	820	840	857	879
1,4	897	917	936	955	977	1000	1020	1040	1060	1090
1,5	1120	1150	1170	1210	1240	1270	1310	1330	1370	1410
1,6	1450	1490	1530	1560	1610	1650	1690	1750	1790	1840
1,7	1900	1940	2000	2070	2140	2220	2300	2380	2500	2600
1,8	2700	2800	2920	3050	3220	3330	3490	3610	3710	4000
1,9	4160	4350	4600	4800	5030	5330	5430	5790	6130	6420
2,0	6750	7170	7400	7790	8150	8520	9000	9400	9750	10 200
2,1	10 600	11 000	11 500	12 100	12 600	13 000	13 500	14 100	14 700	15 400
2,2	15 900	16 500	17 300	17 800	18 500	19 100	19 600	20 300	21 100	22 000
2,3	23 100	24 300	25 500	26 800	28 100	29 500	30 900	32 400	33 900	36 400

Т а б л и ц а П.2.7. **Основная таблица намагничивания**

С т а л ь 2411

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	85	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0,9	166	170	174	179	184	187	194	199	205	211
1,0	217	223	230	237	244	252	260	269	277	286
1,1	295	304	314	324	334	344	355	366	377	388
1,2	399	411	423	435	447	460	473	486	500	540
1,3	585	630	680	735	795	860	930	1000	1070	1150
1,4	1230	1320	1420	1520	1630	1750	1870	2010	2160	2320
1,5	2500	2680	2870	3080	3300	3540	3800	4090	4380	4700
1,6	5000	5380	5760	6200	6650	7120	7650	8200	8800	9400
1,7	10 000	10 500	11 000	11 500	12 000	12 500	13 100	13 700	14 300	14 900
1,8	15 600	16 200	16 800	17 500	18 300	19 100	20 000	20 900	21 900	22 900
1,9	23 900	25 000	26 200	27 400	28 700	30 000	32 000	36 000	42 000	50 000
2,0	59 000	68 000	77 000	86 000	95 000	104 000	113 000	122 000	131 000	140 000
2,1	149 000	158 000	167 000	176 000	185 000	194 000	203 000	212 000	221 000	230 000
2,3	329 000	333 800	347 000	356 000	365 000	374 000	383 000	392 000	401 000	410 000
2,4	419 000	428 000	437 000	446 000	455 000	464 000	473 000	482 000	491 000	500 000

Таблица П.2.8. **Таблица намагничивания для спинки асинхронных двигателей**

Сталь 2411

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	48	48	49	50	51	51	52	53	53	54
0,5	55	56	56	57	58	59	60	61	61	62
0,6	63	64	65	66	67	68	69	69	70	71
0,7	72	72	73	74	75	76	76	77	78	79
0,8	81	82	83	84	85	87	88	90	92	94
0,9	96	98	100	102	104	105	107	109	112	114
1,0	116	118	121	124	126	129	132	136	139	143
1,1	146	150	154	158	162	167	172	176	182	188
1,2	192	198	204	210	216	222	230	238	246	260
1,3	272	288	300	316	330	340	358	370	386	399
1,4	410	440	460	490	530	570	610	660	710	770
1,5	820	890	960	1030	1100	1170	1230	1310	1400	1480
1,6	1560	1640	1730	1820	1920	2000	2100	2260	2440	2600
1,7	2800	2960	3100	3260	3400	3580	3740	3900	4100	4300
1,8	4500	4700	5000	5300	5500	5800	6100	6400	6800	7200
1,9	7600	8000	8500	9100	9700	10 300	11 100	11 900	13 100	14 200
2,0	16 000	18 000	20 000	22 000	23 800	25 500	27 600	29 600	31 500	33 800

Таблица П.2.9. **Таблица намагничивания для зубцов асинхронных двигателей**

Сталь 2411

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	72	73	74	75	77	78	79	80	81	82
0,5	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
0,6	93	94	95	96	97	98	99	101	102	104
0,7	105	106	108	110	111	113	115	117	118	120
0,8	122	124	126	128	130	132	134	136	138	140
0,9	142	144	147	149	151	155	158	160	163	165
1,0	168	171	175	177	180	184	188	191	196	200
1,1	204	207	212	216	222	227	232	237	242	247
1,2	254	259	265	272	277	284	291	298	307	316
1,3	323	333	341	351	361	372	383	394	404	421
1,4	425	432	461	480	497	518	537	554	573	596
1,5	622	644	673	700	728	756	795	828	859	890
1,6	932	976	1020	1070	1130	1180	1260	1350	1440	1520
1,7	1630	1740	1870	2020	2130	2300	2450	2630	2830	3040
1,8	3190	3410	3590	3830	4100	4400	4600	4800	5100	5400
1,9	5700	5900	6300	6600	6900	7200	7700	8100	8300	8700
2,0	9200	9700	10 000	10 500	10 900	11 400	12 000	12 700	13 100	13 700
2,1	14 200	15 000	15 800	16 500	17 200	17 900	18 700	19 800	20 600	21 600
2,2	22 600	23 700	24 600	26 100	26 900	28 700	30 000	31 400	33 200	35 400
2,3	37 600	39 900	42 200	44 600	47 000	49 500	52 000	54 600	57 200	59 800

Таблица П.2.10. **Таблица намагничивания для полюсов**

Сталь 3411

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
1,0	170	170	180	185	190	190	200	200	210	210
1,1	220	220	230	235	240	240	250	260	260	270
1,2	280	290	300	310	320	320	330	340	350	360
1,3	370	380	400	410	420	430	450	460	470	480
1,4	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680
1,5	700	730	760	790	820	850	880	910	940	970
1,6	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
1,7	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2800	3100	3400	3700
1,8	4000	4300	4600	5000	5400	5900	6500	7100	7800	8500
1,9	9200	10 000	11 200	13 000	15 500	19 000	22 500	26 000	30 000	35 000
2,0	40 000	45 000	50 000	55 000	60 000	—	—	—	—	—

Таблица П.2.11. **Основная таблица намагничивания**
Листовая сталь Ст3 толщиной 1—2 мм (для полюсов)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,1	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,2	140	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,3	180	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,4	210	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,5	250	—	—	—	—	275	—	—	—	—
0,6	295	—	—	—	—	320	—	—	—	—
0,7	345	—	—	—	—	375	—	—	—	—
0,8	405	—	—	—	—	440	—	—	—	—
0,9	480	490	495	505	510	520	530	540	550	560
1,0	570	582	595	607	615	630	642	655	665	680
1,1	690	703	720	731	748	760	775	790	808	825
1,2	845	860	880	900	920	940	960	992	1015	1045
1,3	1080	1112	1145	1175	1220	1260	1300	1350	1393	1450
1,4	1490	1530	1595	1645	1700	1750	1835	1920	2010	2110
1,5	2270	2450	2560	2710	2880	3050	3200	3400	3650	3750
1,6	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5580	5950	6230	6600
1,7	7050	7530	7950	8400	8850	9320	9800	10 300	10 800	11 400
1,8	11 900	12 400	13 000	13 500	14 100	14 800	15 600	16 200	17 000	17 800
1,9	18 800	19 700	20 700	21 500	22 600	23 500	24 500	25 600	26 500	27 500
2,0	29 000	30 200	31 500	32 800	34 200	36 100	38 000	—	—	—

22—782

Таблица П.2.12. **Основная таблица намагничивания. Литая сталь Ст3, толстые листы, поковки**

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72
0,1	80	88	96	104	112	120	128	136	144	152
0,2	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232
0,3	240	248	250	264	272	280	288	296	304	312
0,4	320	328	336	344	352	360	368	376	384	392
0,5	400	404	417	426	434	443	452	461	470	479
0,6	488	497	506	516	525	535	544	554	564	574
0,7	584	593	603	613	623	632	642	652	662	672
0,8	682	693	703	724	734	745	755	766	776	787
0,9	798	810	823	835	848	850	873	885	898	911
1,0	924	938	953	969	986	1004	1022	1039	1056	1073
1,1	1090	1108	1127	1147	1167	1187	1207	1227	1248	1269
1,2	1290	1315	1340	1370	1400	1430	1460	1490	1520	1555
1,3	1590	1630	1670	1720	1760	1810	1860	1920	1970	2030
1,4	2090	2160	2230	2300	2370	2440	2530	2620	2710	2800
1,5	2890	2990	3100	3210	3320	3430	3560	3700	3830	3960
1,6	4100	4250	4400	4550	4700	4870	5000	5150	5300	5500

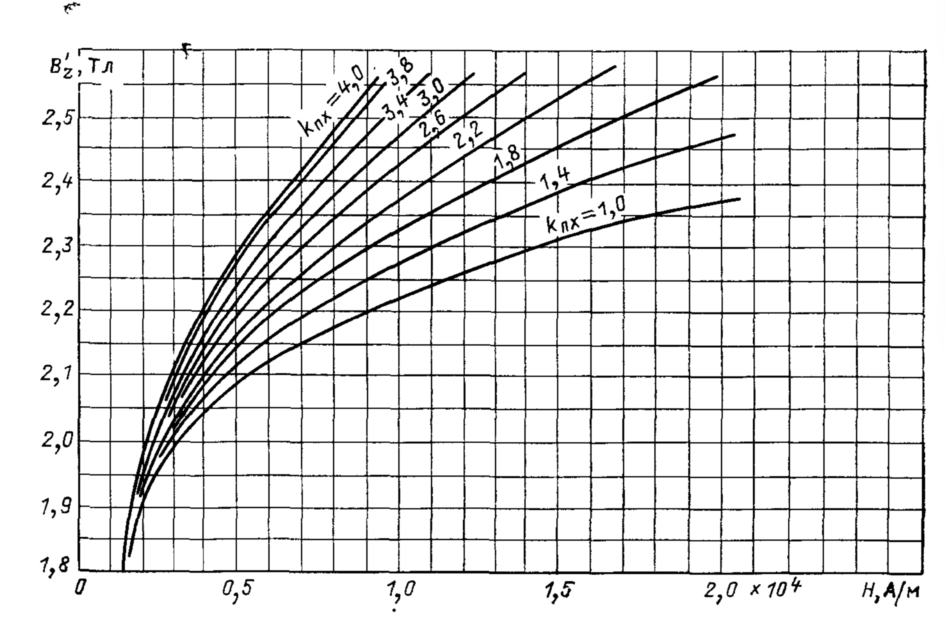


Рис. П.2.1. Кривые намагничивания зубцов асинхронных двигателей из стали марки 2013

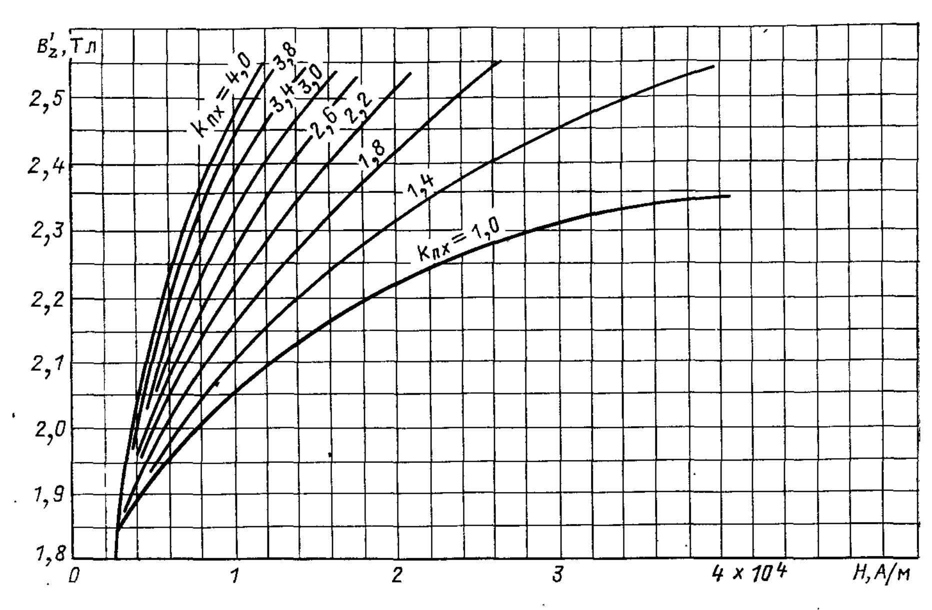


Рис. П.2.2. Кривые намагничивания зубцов асинхронных двигателей из сталей марок 2211, 2312 и 2411

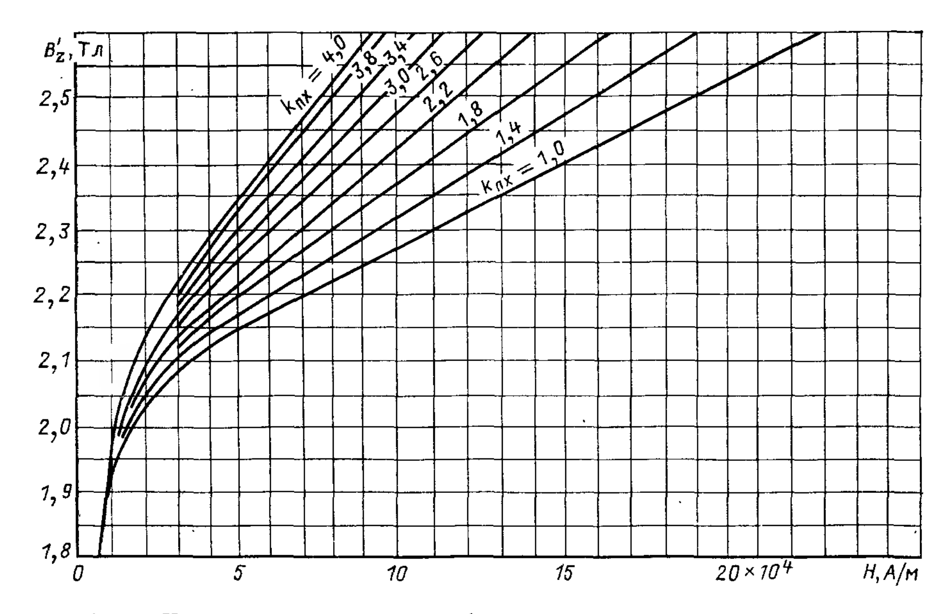


Рис. П.2.3. Кривые намагничивания зубцов синхронных машин и машин постоянного тока из стали марки 2013

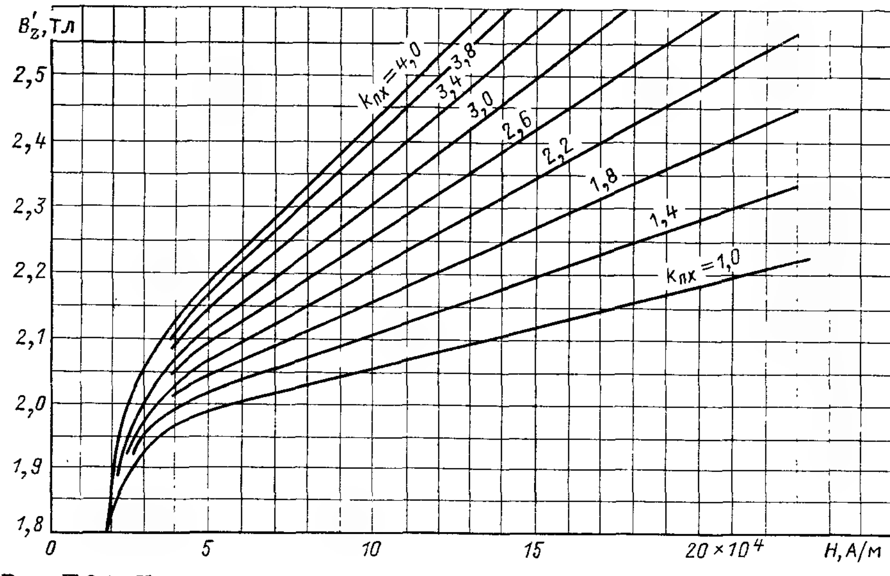


Рис. П.2.4. Кривые намагничивания зубцов синхронных машин и машин постоянного тока из сталей марок 2211, 2312 и 2411

ПРИЛОЖЕНИЕ П.3

ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ

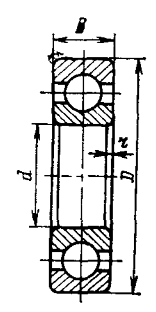


Таблица П.3.1. **Шарикоподшипники радиальные однорядные по ГОСТ 8338-75**

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
			Легкая серия				
200	10	30	9	1	4600	2610	20 000
201	12	32	10	1	4700	2650	20 000
202	15	35	11	1	5850	3470	16 000
203	17	40	12	1	7400	4400	16 000
204	20	47	14	1,5	9800	6200	12 500
205	25	52	15	1,5	10 800	6950	10 000
206	30	62	16	1,5	15 000	10 000	10 000
207	35	72	17	2,0	19 700	13 600	8000
208	40	80	18	2,0	25 100	17 800	6300
209	45	85	19	2,0	25 200	17 800	6300

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
210	50	90	20	2,0	27 000	19 800	6300
211	55	100	21	2,5	33 400	25 100	5000
212	60	110	22	2,5	40 400	30 900	5000
213	65	120	23	2,5	44 000	34 000	5000
214	70	125	24	2,5	48 000	37 400	4000
215	75	130	25	2,5	51 000	41 000	4000
216	80	140	26	3,0	56 000	44 500	4000
217	85	150	28	3,0	64 000	53 100	4000
218	90	160	30	3,0	74 000	60 500	3150
219	95	170	32	3,5	84 000	69 500	3150
220	100	180	34	3,5	94 000	79 000	3150
			Средняя серия				
300	10	35	11	1,0	6 250	3 750	20 000
301	12	37	12	1,5	7 500	4 640	16 000
302	15	42	13	1,5	8 750	5 400	16 000
303	17	47	14	1,5	10 700	6 670	12 500
304	20	52	15	2,0	12 250	7 780	12 500
305	25	62	17	2,0	17 250	11 400	10 000
306	30	72	19	2,0	21 600	14 800	8000
307	35	80	21	2,5	25 700	17 550	8000
308	40	90	23	2,5	31 300	22 200	6300
309	45	100	25	2,5	37 000	26 200	6300
310	50	110	27	3,0	47 500	35 600	5000
311	55	120	29	3,0	55 000	41 800	5000
312	60	130	31	3,5	63 000	48 400	4000
313	65	140	33	3,5	71 300	55 600	4000
314	70	150	35	3,5	80 200	63 200	4000
315	75	160	37	3,5	87 500	71 500	3150
316	80	170	39	3,5	94 600	80 200	3150
317	85	180	41	4,0	102 000	89 400	3150
318	90	190	43	4,0	110 000	99 000	3150
319	95	200	45	4,0	117 600	109 000	2500
320	100	215	47	4,0	134 000	130 000	2500
321	105	225	49	4,0	141 000	142 000	2500
322	110	240	50	4,0	158 000	167 000	2500
324	120	260	55	4,0	167 000	180 000	2000
326	130	280	58	5,0	176 500	194 000	1600
			Тяжелая серия				
403	17	62	17	2,0	17 500	11 900	10 000
405	25	80	21	2,5	28 600	20 400	8000
406	30	90	23	2,5	36 500	26 800	6300
407	35	100	25	2,5	43 000	31 300	6300
408	40	110	27	3,0	49 500	36 400	5000
409	45	120	29	3,0	59 300	45 500	5000
410	50	130	31	3,5	67 200	52 000	4000
411	55	140	33	3,5	77 300	62 500	4000
412	60	150	35	3,5	84 000	70 000	3150
413	65	160	37	3,5	91 000	78 000	3150
414	70	180	42	4,0	111 000	105 000	3150
415	75	190	45	4,0	117 000	115 000	3150
416	80	200	48	4,0	126 000	125 000	2500
417	85	210	52	5,0	134 000	136 000	2500

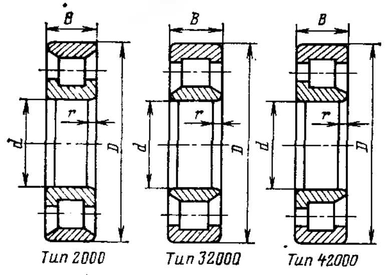


Таблица П.3.2. Роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами по ГОСТ 8328-75

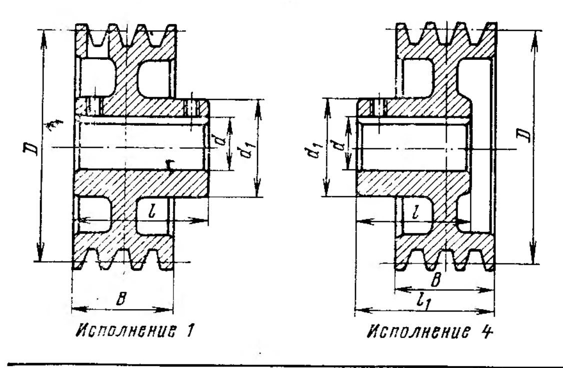
Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
Легкая узкая серия							
2202, 32202, 42202	15	35	11	1,0	5 520	3 020	16 000
2204, 32204, 42204	20	47	14	1,5	11 700	7 250	12 500
2205, 32205, 42205	25	52	15	1,5	13 200	8 450	10 000
2206, 32206, 42206	30	62	16	1,5	17 000	11 200	10 000
2207, 32207, 42207	35	72	17	2,0	25 000	17 200	8000
2208, 32208, 42208	40	80	18	2,0	33 000	23 500	8000
2209, 32209, 42209	45	85	19	2,0	34 300	25 200	6300
2210, 32210, 42210	50	90	20	2,0	38 000	28 600	6300
2211, 32211, 42211	55	100	21	2,5	43 000	32 300	6300
2212, 32212, 42212	60	110	22	2,5	53 700	42 000	5000
2213, 32213, 42213	65	120	23	2,5	61 000	47 600	5000
2214, 32214, 42214	70	125	24	2,5	67 500	47 700	4000
2215, 32215, 42215	75	130	25	2,5	76 500	60 000	4000
2216, 32216, 42216	80	140	26	3,0	78 000	62 300	4000
2217, 32217, 42217	85	150	28	3,0	97 000	80 900	3150
2218, 32218, 42218	90	160	30	3,0	119 000	99 000	3150
— 32219, 42219	95	170	32	3,5	130 000	109 000	3150
2220, 32220, —	100	180	34	3,5	132 500	109 000	2500
— 32221, 42221	105	190	36	3,5	160 000	137 000	2500
2222, 32222, —	110	200	38	3,5	185 000	159 000	2500
2224, 32224, 42224	120	215	40	3,5	209 000	185 000	2500
2226, 32226, 42226	130	230	40	4,0	217 000	195 000	2000
2228, 32228, 42228	140	250	42	4,0	254 000	232 000	2000
Средняя узкая серия							
2305, 32305, 42305	25	62	17	2,0	22 200	14 500	8000
2306, 32306, 42306	30	72	19	2,0	29 600	20 200	8000
2307, 32307, 42307	35	80	21	2,5	33 400	22 800	6300
2308, 32308, 42308	40	90	23	2,5	40 200	28 000	6300
2309, 32309, 42309	45	100	25	2,5	55 500	40 000	6300
2310, 32310, 42310	50	110	27	3,0	64 000	46 500	5000
2311, 32311, 42311	55	120	29	3,0	82 500	61 500	5000
2312, 32312, 42312	60	130	31	3,5	98 000	75 800	4000
2313, 32313, 42313	65	140	33	3,5	103 000	78 800	4000
2314, 32314, 42314	70	150	35	3,5	121 000	95 500	4000
2315, 32315, 42315	75	160	37	3,5	139 000	110 000	3150
2316, 32316, 42316	80	170	39	3,5	147 000	118 500	3150
2317, 32317, 42317	85	180	41	4,0	175 000	143 000	3150
2318, 32318, 42318	90	190	43	4,0	190 000	157 000	2500

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
2319, 32319, 42319	95	200	45	4,0	206 000	171 500	2500
2320, 32320, 42320	100	215	47	4,0	238 000	197 000	2500
2322, 32322, 42322	110	240	50	4,0	301 000	257 000	2000
2324, 32324, 42324	120	260	55	4,0	380 000	332 000	2000
2326, 32326, 42326	130	280	58	5,0	424 000	374 000	2000
2328, 32328, 42328	140	300	62	5,0	469 000	419 000	1600
2332, 32332, 42332	160	340	68	5,0	541 000	497 000	1600
2336, 32336, 42336	180	380	75	5,0	764 000	724 000	1250
2340, 32340, 42340	200	420	80	6,0	860 000	818 000	1250
Средняя широкая серия							
2605, 32605, 42605	25	62	24	2,0	36 700	27 800	8000
2606, 32606, 42606	30	72	27	2,0	40 900	30 600	8000
2607, 32607, 42607	35	80	31	2,5	45 800	34 200	6300
2608, 32608, 42608	40	90	33	2,5	59 900	46 600	6300
2609, 32609, 42609	45	100	36	2,5	77 700	61 500	6300
2610, 32610, 42610	50	110	40	3,0	102 000	85 500	5000
2611, 32611, 42611	55	120	43	3,0	113 000	92 500	5000
2612, 32612, 42612	60	130	46	3,5	137 000	116 000	4000
2613, 32613, 42613	65	140	48	3,5	149 000	126 500	4000
2615, 32615, 42615	75	160	55	3,5	208 000	183 000	3150
2616, 32616, 42616	80	170	58	3,5	220 000	198 000	3150
2617, 32617, 42617	85	180	60	4,0	254 000	230 000	3150
2618, 32618, 42618	90	190	64	4,0	265 000	240 000	2500
2620, 32620, 42620	100	215	73	4,0	356 000	336 000	2500
2622, 32622, 42622	110	240	80	4,0	264 000	450 000	2000
2624, 32624, 42624	120	260	86	4,0	548 000	532 000	2000
2626, 32626, 42626	130	280	93	5,0	650 000	650 000	2000
2630, 32630, 42630	150	320	108	5,0	753 000	757 000	1600
2634, 32634, 42634	170	360	120	5,0	1 040 000	1 080 000	1250
Тяжелая серия							
— 32410, 42410	50	130	31	3,5	100 000	75 000	4000
2411, 32411, 42411	55	140	33	3,5	108 000	82 000	4000
2412, 32412, 42412	60	150	35	3,5	121 000	101 000	4000
2413, 32413, 42413	65	160	37	3,5	143 000	112 000	3150
2414, 32414, —	70	180	42	4	183 000	147 000	3150
2415, 32415, 42415	75	190	45	4	212 000	173 000	3150
2416, 32416, —	80	200	48	4	244 000	200 000	2500
2417, 32417, 42417	85	210	52	5	266 000	221 000	2500
2418, 32418, 42418	90	225	54	5	300 000	252 000	2500
— 32419, —	95	240	55	5	320 000	273 000	2500
2420, 32420, 42420	100	250	58	5	360 000	310 000	2000
2421, 32421, 42421	105	260	60	5	400 000	345 000	2000
2422, 32422, 42422	110	280	65	5	445 000	388 000	2000
2424, 32424, 42424	120	310	72	6	557 000	500 000	2000
— 32426, 42426	130	340	78	6	670 000	605 000	1250
— 32428, 42428	140	360	82	6	725 000	655 000	1250

ПРИЛОЖЕНИЕ П.4

РАЗМЕРЫ ВЫСТУПАЮЩЕГО КОНЦА ВАЛА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО ГОСТ 18709—73 и ГОСТ 20839—75

Диаметр d_1, мм	Длина l_1, мм	Наибольший момент вращения, Н·м	Диаметр d_1, мм	Длина l_1, мм	Наибольший момент вращения, Н·м
7	16	0,25	75	140	1000
9	20	0,63	80	170	1250
11	23	1,25	85	170	1600
14	30	2,8	90	170	1900
16	40	4,5	95	170	2360
18	40	7,1	100	210	2800
19	40	8,25	110	210	4000
22	50	14	120	210	—
24	50	18	125	210	—
28	60	31,5	130	250	—
32	80	50	140	250	—
38	80	90	150	250	—
42	110	125	160	300	—
48	110	200	170	300	—
55	110	355	180	300	—
60	140	450	190	350	—
65	140	630	200	350	—
70	140	800	220	350	—



Исполнение 1 *Исполнение 4*

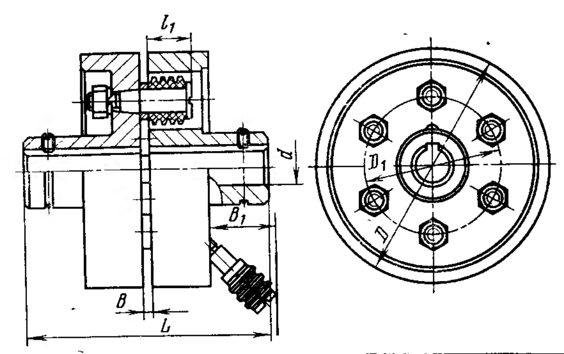
ПРИЛОЖЕНИЕ П.5

РАЗМЕРЫ, МАССА И ДИНАМИЧЕСКИЙ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ШКИВОВ ДЛЯ КЛИНОВЫХ РЕМНЕЙ

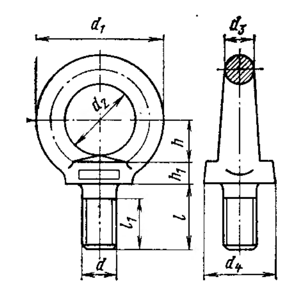
Условное обозначение	Размеры, мм						Масса, кг	Динамический момент инерции, кг·м²	Число канавок	Тип ремня	Исполнение	Номер нормали машиностроения
	d	D	B	l	l_1	d_1						
121 001	14	112	16	30	—	32	1,06	0,0015	1	0	1	МН4437-63
121 008	22	112	40	50	56	40	1,71	0,003	3	0	4	МН4437-63
121 010	28	112	40	60	—	50	1,95	0,003	3	0	1	МН4437-63
121 023	32	125	40	80	—	60	2,81	0,005	3	0	1	МН4437-63
221 029	38	140	38	80	—	80	5,4	0,011	4	А	1	МН4440-63
221 073	42	200	68	110	—	80	7,81	0,043	4	А	1	МН4440-63
321 070	48	224	105	110	—	80	14	0,105	5	Б	1	МН4443-63
324 075	55	224	105	110	130	100	15,5	0,109	5	Б	4	МН4443-63
421 030	60	250	138	140	—	125	28	0,23	5	В	1	МН4446-63
421 031	65	250	138	140	—	125	27,5	0,23	5	В	1	МН4446-63
421 051	70	280	164	140	—	125	34,1	0,39	6	В	1	МН4446-63
421 052	75	280	164	140	—	125	33,5	0,39	6	В	1	МН4446-63

ПРИЛОЖЕНИЕ П.6

РАЗМЕРЫ, МАССА, ДИНАМИЧЕСКИЙ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ И НАИБОЛЬШИЙ КРУТЯЩИЙ МОМЕНТ ДЛЯ УПРУГИХ ВТУЛОЧНО-ПАЛЬЦЕВЫХ МУФТ



Условное обозначение	Размеры, мм							Крутящий момент, Н·м	Частота вращения, об/мин	Масса, кг	Динамический момент инерции, кг·м²
	d	D	L	B	B_1	l_1	D_1				
МУВП1-22	22	100	104	1—4	28	25	68	54	5600	2,14	0,002
МУВП1-28	28	120	125	1—5	42	32	84	127	4750	4,40	0,006
МУВП1-32	32	140	165	1—5	42	32	100	235	4000	7,33	0,014
МУВП1-38	38	140	165	1—5	42	32	100	235	4000	6,97	0,014
МУВП1-42	42	170	226	2—6	55	42	120	440	3350	13,27	0,039
МУВП1-45	45	170	226	2—6	55	42	120	440	3350	12,93	0,039



ПРИЛОЖЕНИЕ П.7

РАЗМЕРЫ, МАССА И ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬ РЫМ-БОЛТОВ (ГОСТ 4751—73)

Условное обозначение резьбы, мм	Размеры, мм								Масса, кг	Грузоподъемность, Н
	d_1	d_2	d_3	d_4	h	h_1	l	l_1 (не менее)		
М8	36	20	8	20	12	6	18	12	0,05	1 200
М10	45	25	10	25	16	8	21	15	0,12	2 000
М12	54	30	12	30	18	10	25	19	0,19	3 000
М16	63	35	14	36	20	12	32	25	0,31	5 500
М20	72	40	16	40	24	14	38	29	0,50	8 500
М24	90	50	20	50	29	16	45	35	0,87	12 500
М30	108	60	24	63	37	18	55	44	1,58	20 000
М36	126	70	28	75	43	22	63	51	2,43	30 000
М42	144	80	32	85	50	25	72	58	3,72	40 000
М48	162	90	36	95	52	30	82	68	5,54	50 000
М56	180	100	40	105	60	34	95	78	8,09	62 000

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гурин Я. С., Кузнецов Б. И.** Проектирование серий электрических машин. М.: Энергия, 1978. 480 с.
2. **Проектирование** электрических машин/Под ред. И. П. Копылова. М.: Энергия, 1980. 495 с.
3. **Домбровский В. В., Хуторецкий Г. М.** Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л.: Энергия, 1974. 503 с.
4. **Рабинович И. Н., Шубов И. Г.** Проектирование машин постоянного тока. Л.: Энергия, 1967. 504 с.
5. **Морозов А. Г.** Расчет электрических машин постоянного тока. М.: Высшая школа, 1977. 264 с.
6. **Асинхронные** двигатели общего назначения/Под ред. В. М. Петрова и А. Э. Кравчика. М.: Энергия, 1980, 488 с.
7. **Асинхронные** двигатели серии 4А: Справочник/А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
8. **Белоруссов Н. И., Саакян А. Е., Яковлева А. И.** Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник/Под общ. ред. Н. И. Белоруссова. М.: Энергия, 1979. 416 с.
9. **Кацман М. М.** Электрические машины. М.: Высшая школа, 1983. 431 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯВНОПОЛЮСНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА